

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

EDWIN LEÓNIDAS VARGAS GUZMÁN

**PETROFÍSICA DE ROCHAS ARENOSAS DA
BACIA DO PARANÁ PARA A ESTOCAGEM E
MINERALIZAÇÃO DE CO₂**

São Paulo, SP

2023

EDWIN LEÓNIDAS VARGAS GUZMÁN

**PETROFÍSICA DE ROCHAS ARENOSAS DA BACIA DO
PARANÁ PARA A ESTOCAGEM E MINERALIZAÇÃO DE
CO₂**

Versão Corrigida

Dissertação de Mestrado apresentado ao Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Tecnologia da Energia.

Orientador: Lucy Gomes Sant'Anna

São Paulo, SP

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Vargas Guzmán, Edwin Leónidas.

Petrofísica de rochas arenosas da bacia do Paraná para a estocagem e mineralização de CO_2 . / Edwin Leónidas Vargas Guzmán; orientadora: Lucy Gomes Sant'Anna. – São Paulo, 2023.

158 f.: il; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo.

1. Dióxido de carbono - armazenamento. 2. Fluorescência. 3. Difração por raios x. I. Título.

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Nome: Edwin Leónidas Vargas Guzmán

Título: PETROFÍSICA DE ROCHAS ARENOSAS DA BACIA DO PARANÁ PARA A ESTOCAGEM E MINERALIZAÇÃO DE CO₂

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Data da aprovação:

Orientador:

Dra. Lucy Gomes Sant'Anna
PPGE/IEE/USP

Professor

Convidado 1

Professor

Convidado 2

São Paulo, SP

2023

Dedicado a todas as pessoas que me apoiaram em minha jornada.

*À minha mãe, Esther Guzmán, e ao meu pai, Victor Vargas, agradeço por me
presentearem com o valioso dom da educação.*

*Nunca desista. Se você tiver vontade, determinação e, acima de tudo, um grande coração,
encontrará um caminho repleto de novas oportunidades. Continue, aprenda, cresça e
mantenha-se atento aos seus sentidos, pois sempre poderá encontrar algo belo e único
neste maravilhoso mundo. Você pode!*

Agradecimentos

Aos meus pais, por me fazerem crescer e me tornarem a pessoa que sou agora. Obrigado pelos grandes esforços e por me proporcionarem a melhor educação.

À minha orientadora, Profa. Dra. Lucy Gomes Sant'Anna, pelo seu apoio desde o primeiro contato e por estar sempre atenta durante a pesquisa.

Ao melhor amigo que pude encontrar nesta terra brasileira, Robson Rodrigues, e à sua bondosa família, seu apoio e amizade me fizeram conhecer muito desta bela cultura.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento durante todo o mestrado.

À equipe técnica do Instituto de Energia e Ambiente, pelo seu apoio durante a aquisição de parte dos dados utilizados nesta pesquisa.

À Secretaria do Programa de Pós-Graduação do IEE, por sempre esclarecer as minhas dúvidas sobre os procedimentos burocráticos e administrativos.

*"O sucesso não acontece por acaso. É trabalho duro, perseverança, aprendizado, estudo, sacrifício e, acima de tudo, amor pelo que você está fazendo ou aprendendo a fazer."
(Pelé)*

RESUMO

Vargas Guzmán, E. **Petrofísica de rochas arenosas da Bacia do Paraná para a estocagem e mineralização de CO₂**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Energia, Universidade de São Paulo, 2023. As tecnologias de Captura e Armazenamento de CO₂ (CCS) desempenham um papel crucial na mitigação das emissões de CO₂ e no cumprimento das metas de descarbonização estabelecidas pelo Acordo de Paris (2015). A Bacia do Paraná, localizada entre Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina, é um local promissor para o armazenamento de CO₂ devido à sua proximidade com fontes emissoras estacionárias e à presença de diversos corpos arenosos com potencial capacidade de estocagem. Esta pesquisa visa avaliar a viabilidade do armazenamento de CO₂ nas formações eopermianas Rio Bonito e San Miguel, desenvolvendo uma análise detalhada das propriedades mineralógicas e petrofísicas dessas formações. Este estudo também inclui uma análise comparativa entre as duas formações, a identificação de camadas de arenito apropriadas para o armazenamento de CO₂ e considerações sobre as rochas selantes. A pesquisa identificou quatro camadas de arenito que apresentam as características mais adequadas para o armazenamento de CO₂ na Fm. Rio Bonito, especialmente devido à alta porosidade e baixa porcentagem de argila. Destaca-se a camada A do testemunho 2-AA-1-SP (Amadeu Amaral, SP) ao exibir os melhores parâmetros em termos de porosidade (21,32 %) e conteúdo de argila (6,439 %). Da mesma forma, na Fm. San Miguel, dos testemunhos analisados unicamente Ines G-2 (IG-2) (Alto Paraná) apresentou camadas consideradas adequadas para armazenamento, destacando-se a camada C devido à sua alta porosidade (21,69 %), baixo conteúdo de argila (12,623 %) e espessura considerável (27 m). No entanto, em todos os testemunhos, foram identificadas camadas que poderiam ser consideradas candidatas adequadas para a injeção de CO₂ em fases que não exigem profundidades superiores a 800 m. Adicionalmente, foram analisadas 15 amostras do testemunho Mallorquín N° 1 (ML-1) (Alto Paraná, PY), nas quais foram encontrados altos teores de Ca, Th e U e baixos teores de Fe, Ni e K. Isso sugere que, apesar da baixa porcentagem de Fe nas amostras, o alto conteúdo de Ca encontrado poderia garantir a mineralização de CO₂ de forma efetiva. Dessa forma, as camadas de arenito localizadas no Brasil e no Paraguai apresentam favorabilidade considerável para o armazenamento de CO₂. As camadas paraguaias destacam-se por exibirem espessuras consideráveis para o armazenamento e por estarem localizadas em profundidades mais rasas, o que poderia reduzir significativamente os custos de perfuração, transporte e injeção de CO₂. Por fim, verificou-se que as camadas de arenito identificadas nas formações Rio Bonito e San Miguel compartilham características similares com as dos reservatórios geológicos utilizados em projetos internacionais de CCS de sucesso associados à indústria de etanol.

Palavras-chave: BECCS. Formação Rio Bonito. Formação San Miguel. *Multi-Sensor Core Logger*. Fluorescência de raios X. Difração de raios X.

ABSTRACT

Vargas Guzmán, E. **Petrophysics of sandy rocks in the Paraná Basin for CO₂ Storage and Mineralization**. 2023. Dissertation (Master's in Science) - Graduate Program in Energy Technology, University of São Paulo, 2023.

Carbon Capture and Storage (CCS) technologies play a crucial role in mitigating CO₂ emissions and meeting the decarbonization goals established by the Paris Agreement (2015). The Paraná Basin, located between Brazil, Paraguay, Uruguay, and Argentina, is a promising location for CO₂ storage due to its proximity to stationary emission sources and the presence of several sandstones with potential storage capacity. This research aims to evaluate the feasibility of CO₂ storage in the Rio Bonito and San Miguel Eopermian formations, developing a detailed analysis of the mineralogical and petrophysical properties of these formations. This study also includes a comparative analysis between the two formations, the identification of sandstone layers suitable for CO₂ storage and considerations about seal rocks. The research identified four sandstone layers with the most suitable characteristics for CO₂ storage in the Rio Bonito Formation, especially due to their high porosity (21.32 %) and low clay content (6.439 %). The A layer of the 2-AA-1-SP core (Amadeu Amaral, SP) stands out as it exhibits the best parameters in terms of porosity and clay content. Similarly, in the Fm. San Miguel, of the analyzed samples, only IG-2 (Alto Paraná) presented layers considered suitable for storage, with layer C standing out due to its high porosity (21.69%), low clay content (12.623%), and considerable thickness (27 m). However, in all cores, layers were identified that could be considered suitable candidates for CO₂ injection in phases that do not require depths greater than 800 m. Additionally, 15 samples from the ML-1 (Alto Paraná, PY) core were analyzed, in which high contents of Ca, Th, and U and low contents of Fe, Ni, and K were found. This suggests that, despite the low percentage of Fe in the samples, the high Ca content found could ensure effective CO₂ mineralization. Thus, the sandstone layers located in Brazil and Paraguay present considerable favorability for CO₂ storage. Paraguayan layers stand out for exhibiting considerable thicknesses for storage and for being located at shallower depths, which could significantly reduce drilling, transportation, and CO₂ injection costs. Finally, it was found that the sandstone layers identified in the Rio Bonito and San Miguel formations share similar characteristics with geological reservoirs used in successful international CCS projects associated with the ethanol industry.

Keywords: BECCS. Rio Bonito Formation. San Miguel Formation. Multi-Sensor Core Logger. X-ray fluorescence. X-ray diffraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa de emissões de CO ₂ (kt/ano) e localização das bacias sedimentares brasileiras. Fonte: Rockett et al. (2011).	24
Figura 2 – Emissões globais de Gases de Efeito Estufa por setor em 2016. Fonte: Ritchie, Roser e Rosado (2020).	29
Figura 3 – Emissões globais de CO ₂ em 2017. Fonte: Ritchie, Roser e Rosado (2020).	29
Figura 4 – Emissões totais de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2020. Fonte: Observatório do Clima (2020)	30
Figura 5 – Distribuição de emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2020 por Unidade Federativa. Fonte: Observatório do Clima (2020)	30
Figura 6 – Distribuição de emissões de Gases de Efeito Estufa do setor energético brasileiro em 2020. Fonte: Modificado de Observatório do Clima (2020).	31
Figura 7 – Variação da densidade do CO ₂ em relação à profundidade. Fonte: Menacherry et al. (2009).	32
Figura 8 – Evolução da extensão dos mecanismos de captura de CO ₂ com o tempo. A extensão de cada mecanismo de armadilha é altamente específica do local e depende de vários parâmetros, incluindo o tipo de rocha: rochas carbonáticas e siliciclásticas (painel esquerdo), ou rochas máficas e ultramáficas que têm a capacidade de reagir muito mais rapidamente com CO ₂ para formar carbonatos (painel direito). Fonte: Kelemen et al. (2019)	33
Figura 9 – Opções para armazenamento de CO ₂ em formações geológicas subterrâneas profundas. Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2005)	34
Figura 10 – Localização da Bacia do Paraná, mostrando as profundidades do embasamento e as supersequências sedimentares. Fonte: Milani, França e Medeiros (2007)	37
Figura 11 – Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná. A Formação Rio Bonito faz parte do Grupo Permiano Guatá. Fonte: Superintendência de Definição de Blocos (2017)	38
Figura 12 – Coluna cronoestratigráfica da sucessão Carbonífero Tardio-Eopermiano da borda leste da Bacia do Paraná. O intervalo da Fm. do Rio Bonito é realçado pelo retângulo de linha tracejada vermelha. Fonte: Modificado de Maahs et al. (2019)	39
Figura 13 – Relações estratigráficas do Grupo Guatá. Fonte: Modificado de Schneider et al. (1974)	39

Figura 14 – Modelo de profundidades da Fm. Rio Bonito na Bacia do Paraná. Fonte: Bocardi et al. (2009)	40
Figura 15 – Mapa de isópacas da Fm. Rio Bonito. Contornos em metros. Fonte: Zalán (1990)	41
Figura 16 – Localização dos poços Mallorquín N° 1, Ines G-1 e Ines G-2 a serem utilizados para a geração de perfis e comparações litológicas da Fm. San Miguel no departamento do Alto Paraná, Paraguai.	43
Figura 17 – Localização de poços selecionados nessa pesquisa, parques de bioenergia da empresa Raizen e limite da Bacia do Paraná. Fontes: Poços tomados de Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020) e parques de bioenergia tomados de Raizen (2020).	46
Figura 18 – Exemplo de descrição macroscópica de amostra de testemunho.	49
Figura 19 – Equipamento Multi-Sensor Core Logger da companhia Geotek Limited instalado no Instituto de Energia e Ambiente da USP.	49
Figura 20 – Valores de susceptibilidade magnética das rochas. Fonte: (DEVELOPERS, apud CLARK; EMERSON, 1991).	51
Figura 21 – Grupos de amostras selecionadas do testemunho Mallorquín N° 1 que atingiram a Fm. San Miguel. (A) Grupo 1 de amostras características de topo a base: 11, 14, 20, 21, 24, 29, 30A, 30B e 87. (B) Grupo 2 de amostras características de topo a base: 74, 73, 71, 72, 69 e 70.	54
Figura 22 – Modelo de três planos cristalográficos (hkl) usado para visualizar o comportamento dos raios X sendo refletidos de acordo com a lei de Bragg. Fonte: Jenkins e Snyder (1996).	56
Figura 23 – A geometria Bragg-Brentano é empregada na configuração θ - 2θ de um difratômetro de raios X. Fonte: Jenkins e Snyder (1996).	57
Figura 24 – Difratômetro de raios X com configuração θ - θ , no qual o tubo de raios X e o detector estão acoplados. Fonte: Silva (2013).	58
Figura 25 – Difratograma do cristal de NaCl com identificação de seus índices de Miller correspondentes. Fonte: Silva (2013).	59
Figura 26 – (a) Etapa de medição da massa dos fragmentos das amostras. (b) Fragmentação de amostra por meio de moagem utilizando um pistilo e um almofariz de ágata. (c) Amostra moída colocada em um porta-amostra acrílico. (d) Difratômetro Bruker D8 Advance Eco nas instalações do IEE USP.	60
Figura 27 – Localização de poços selecionados nessa pesquisa, parques de bioenergia da empresa Raizen e isópacas da Fm. Rio Bonito. Fontes: Poços tomados de Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020). Parques de bioenergia tomados de Raizen (2020). Isópacas tomadas de Zalán (1990).	65

Figura 28 – Comparação litológica da Fm. Rio Bonito para a região de SP com orientação NE-SW e escala vertical relativa. A comparação foi obtida por meio dos perfis estratigráficos de 2-AA-1-SP a 2-OL-1-SP. Granulação indicada na base dos perfis: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. Nos perfis é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte: Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020)	67
Figura 29 – Comparação litológica da Fm. Rio Bonito para a região de SP com orientação NE-SW e escala vertical relativa para visualização das diferenças de espessura da formação. A comparação foi obtida para os perfis litológicos elaborados para os testemunhos 2-AA-1-SP a 2-OL-1-SP. Granulação indicada na base dos perfis: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. Nos perfis é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte dos testemunhos de sondagem: Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020)	69
Figura 30 – Comparação litológica da Fm. Rio Bonito com escala vertical aumentada para melhor visualização das litologias e cores das camadas. Granulação indicada na base dos perfis: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. Nos perfis é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte: Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020)	70
Figura 31 – Comparação litológica da Fm. San Miguel com escala vertical aumentada elaborado para os testemunhos Inés-1, Inés-2 e Mallorquín N° 1, situados no Paraguai. Granulação indicada na base do perfil: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. No perfil é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte: Kovacs (1990).	72
Figura 32 – Difratoograma de raios X da amostra ML-11 localizada a 713 m de profundidade.	105
Figura 33 – Difratoograma de raios X da amostra ML-14 localizada a 718,4 m de profundidade.	105
Figura 34 – Difratoograma de raios X da amostra ML-87A localizada a 835,0 m de profundidade.	106
Figura 35 – Difratoograma de raios X da amostra ML-87B localizada a 835,0 m de profundidade.	106
Figura 36 – Difratoograma de raios X da amostra ML-70 localizada a 1190,6 m de profundidade.	107
Figura A1 – Amostra N° 74 localizada a 1151,2 m	123
Figura A2 – Amostra N° 73 localizada a 1152,1 m.	124
Figura A3 – Amostra N° 71 localizada a 1163,5 m.	124
Figura A4 – Amostra N° 72 localizada a 1164,5 m.	124
Figura A5 – Amostra N° 69 localizada a 1189,9 m.	125

Figura A6 – Amostra N° 70 localizada a 1190,6 m.	125
Figura A7 – Amostra N° 11 localizada a 1190,6 m.	125
Figura A8 – Amostra N° 14 localizada a 718,4 m.	126
Figura A9 – Amostra N° 20 localizada a 736,8 m.	126
Figura A10–Amostra N° 21 localizada a 738,1 m.	127
Figura A11–Amostra N° 24 localizada a 747,6 m.	127
Figura A12–Amostra N° 29 localizada a 759,7 m.	128
Figura A13–Amostra N° 30A localizada a 760,3 m.	128
Figura A14–Amostra N° 30B localizada a 761,4 m.	129
Figura A15–Amostra N° 87 localizada a 835,0 m.	129
Figura B1 – Imagem RGB do grupo 1 de amostras selecionadas do testemunho ML-1. Ordem de topo a base: 74, 73, 71, 72, 69 e 70. Profundidade relativa.	131
Figura B2 – Imagem RGB do grupo 2 de amostras selecionadas do testemunho ML-1. Ordem de topo a base: 11, 14, 20, 21, 24, 29, 30A, 30B e 87. Profundidade relativa.	132
Figura B3 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-74.	133
Figura B4 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-73.	134
Figura B5 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-71.	135
Figura B6 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-72.	136
Figura B7 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-69.	137
Figura B8 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-70.	138
Figura B9 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-11.	139
Figura B10–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-14.	140
Figura B11–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-20.	141
Figura B12–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-21.	142
Figura B13–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-24.	143
Figura B14–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, ele- mentos traço, e imagem RGB da amostra ML-29.	144

Figura B15–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-30A.	145
Figura B16–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-30B.	146
Figura B17–Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-87.	147

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Poços selecionados para as comparações litológicas das formações Rio Bonito e San Miguel.	47
Tabela 2 – Grupo 1 de amostras selecionadas para serem analisadas com os equipamentos MSCL e DRX	53
Tabela 3 – Grupo 2 de amostras selecionadas para serem analisadas com os equipamentos MSCL e DRX	54
Tabela 4 – Parâmetros do testemunho 2-OL-1-SP	76
Tabela 5 – Parâmetros do testemunho 2-AR-1-SP	76
Tabela 6 – Parâmetros do testemunho 2-AA-1-SP	77
Tabela 7 – Parâmetros do testemunho 2-PP-1-SP	78
Tabela 8 – Parâmetros do testemunho 1-TI-1-SP	78
Tabela 9 – Parâmetros do testemunho 2-AP-1-PR	79
Tabela 10 – Parâmetros do testemunho 2-RI-1-PR	80
Tabela 11 – Parâmetros do testemunho 2-CM-1-PR	80
Tabela 12 – Parâmetros do testemunho 2-AN-1-PR	81
Tabela 13 – Parâmetros do testemunho Ines G-1	82
Tabela 14 – Parâmetros do testemunho Ines G-2	83
Tabela 15 – Parâmetros do testemunho ML-1	84
Tabela 16 – Médias de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética e teores de elementos químicos de amostras do Grupo 1.	92
Tabela 17 – Médias de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética e teores de elementos químicos de amostras do Grupo 2. Os valores em negrito representam valores superiores à média do dado de referência.	104
Tabela 18 – Minerais identificados nos difratogramas de raios X das amostras do testemunho Mallorquín N° 1.	107
Tabela 19 – Melhores camadas selecionadas para o armazenamento de CO ₂ no Brasil.	108
Tabela 20 – Melhores camadas selecionadas para o armazenamento de CO ₂ no Paraguai.	108
Tabela 21 – Análise macroscópica do grupo 1 de amostras analisadas com os equipamentos MSCL e DRX	122
Tabela 22 – Análise macroscópica do grupo 2 de amostras analisadas com os equipamentos MSCL e DRX	123
Tabela C1 – Resultados do grupo 1 de amostras	149
Tabela C1 – Continuação.	150
Tabela C2 – Resultados do grupo 2 de amostras	151
Tabela C2 – Continuação.	152

Tabela C2 – Continuação.	153
Tabela 1 – Tabela de elementos usados para a análise de teores segundo a composição da Crosta Continental Superior de McLennan (2001).	155

Lista de abreviaturas e siglas

ACP	Análise de Componentes Principais
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASU-1	Asunción N° 1
ASU-2	Asunción N° 2
BR	Brasil
BECCS	Bioenergia com Captura e Armazenamento de CO ₂
CCS	Captura e Armazenamento de CO ₂
CCUS	Captura, Utilização e Armazenamento de CO ₂
COP26	XXVI Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática
DRX	Difração de raios X
EOR	<i>Enhanced Oil Recovery</i>
Fm.	Formação
GEE	Gases de Efeito Estufa
GR	<i>Gamma Ray</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IG-1	Ines G-1
IG-2	Ines G-2
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
ML-1	Mallorquín N° 1
MSCL	<i>Multi-Sensor Core Logger</i>
PR	Estado do Paraná
PY	Paraguai
RGB	<i>Red, Green, Blue</i>
SP	Estado de São Paulo

USP Universidade de São Paulo

XRF *X-ray Fluorescence*

Lista de símbolos

Al	Alumínio
θ	Ângulo de incidência
Å	Ångström
Ca	Cálcio
cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de Carbono
°C	Graus Celsius
E	Leste
Fe	Ferro
ft	Pé
Gt	Gigatonelada
H	Hidrogênio
K	Potássio
km	Quilômetro
km ²	Quilômetro quadrado
kt	Quilotonelada
m	Metro
Mg	Magnésio
mm	Milímetro
Mt	Megatonelada
MtpaCO ₂	Milhões de toneladas por ano de CO ₂
N	Norte
Ni	Níquel
O	Oxigênio
ϕ	Porosidade

ppm	Partes por milhão
Rb	Rubídio
S	Sul
Si	Silício
SI	Sistema Internacional (Unidade)
Sr	Estrôncio
Th	Tório
Ti	Titânio
U	Urânio
W	Oeste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	25
1.2	Apresentação do problema	25
1.3	Objetivos	26
1.4	Estrutura da dissertação	27
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1	Aspectos gerais sobre a emissão antropogênica de CO ₂	28
2.2	Armazenamento geológico de CO ₂	32
2.3	Bioenergia com Captura e Armazenamento de CO ₂	35
2.4	Contexto geológico	36
2.4.1	Bacia do Paraná	36
2.4.2	Formação Rio Bonito	36
2.4.3	Formação San Miguel	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Levantamento bibliográfico	44
3.2	Levantamento de fontes estacionárias de CO ₂	45
3.3	Área de estudo das formações Rio Bonito e San Miguel	45
3.4	Levantamento de dados de rochas arenosas das formações Rio Bonito e San Miguel em perfis estratigráficos	45
3.5	Caracterização das propriedades do reservatório utilizando curvas de perfilagem geofísica de poços	47
3.6	Análises laboratoriais	48
3.6.1	Descrição macroscópica de amostras	48
3.6.2	Multi-Sensor Core Logger	48
3.6.3	Susceptibilidade magnética	50
3.6.4	Espectrometria Gama Natural	51
3.6.5	Fluorescência de Raios-X	52
3.6.6	Caracterização de amostras utilizando Multi-Sensor Core Logger	53
3.6.7	Princípios da Difração de Raios X	55
3.6.8	Caracterização de amostras através de Difração de raios X	58
4	RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS	61
4.1	Projetos internacionais de CCS/CCUS	61
4.2	Dados geológicos e comparações de testemunhos	64

4.3	Resultados da análise macroscópica de amostras selecionadas do testemunho ML-1	73
4.4	Implicações para a estocagem de CO ₂ nas formações Rio Bonito e San Miguel	74
4.5	Resultados das análises de amostras selecionadas do testemunho ML-1 com o equipamento MSCL	84
4.6	Resultados das análises de amostras selecionadas do testemunho ML-1 com o equipamento de DRX	105
4.7	Seleção de camadas potenciais para o armazenamento de CO ₂ nas formações Rio Bonito e San Miguel	108
5	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	109
6	CONCLUSÕES	113
	Referências	115
	 APÊNDICES	 121
APÊNDICE A	– AMOSTRAS SELECIONADAS DO TESTEMUNHO MALLORQUÍN N° 1	122
APÊNDICE B	– CURVAS E IMAGENS RGB DAS AMOSTRAS SELECIONADAS DO TESTEMUNHO ML-1 USANDO EQUIPAMENTO MSCL	130
APÊNDICE C	– RESULTADOS DE AMOSTRAS SELECIONADAS DO TESTEMUNHO ML-1 USANDO EQUIPAMENTO MSCL	148
	 ANEXOS	 154
ANEXO A	– REFERENCIA DE ELEMENTOS TRAÇO	155

INTRODUÇÃO

As tecnologias de Captura e Armazenamento de CO₂ (CCS) têm recebido muita atenção nos últimos anos devido ao seu potencial como importantes ferramentas de mitigação de emissões de CO₂ para cumprir as metas de descarbonização do Acordo de Paris, ratificado na XXVI Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26) em Glasgow. Tais tecnologias têm o potencial de reduzir significativamente as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) até 2030 e alcançar a descarbonização total até 2050 (United Nations Environment Programme, 2021).

As tecnologias de Captura e Armazenamento de CO₂ (CCS) tem como objetivo principal remover o CO₂ de uma fonte estacionária e armazená-lo em solos, vegetação, corpos de água ou estruturas geológicas subterrâneas. Neste último, o CO₂ deve ser armazenado por longos períodos dependendo do mecanismo de aprisionamento, com estimativas na ordem de 10 mil anos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005). Desde 2020, ao menos 146 projetos de CCS têm sido associados a diversos setores industriais, como processamento de gás natural, produção de fertilizantes, produção de hidrogênio, geração de energia, produção de ferro e aço, e produção de etanol. Contudo, existem apenas 30 projetos comerciais ativos, que compreendem instalações que conduzem tanto operações comerciais relacionadas a um setor industrial, quanto a captura de CO₂ para armazenamento permanente (Global CCS Institute, 2020).

O Brasil já conta com um projeto comercial de Captura, Utilização, e Armazenamento de CO₂ (CCUS) atualmente em operação e mostra uma situação favorável em relação ao potencial de utilização das tecnologias de CCS, pois possui a maioria das fontes estacionárias próximas a grandes bacias sedimentares com potencial para o armazenamento de CO₂ (Fig. 1). Essas bacias são favoráveis devido à presença de rochas, principalmente sedimentares, que podem apresentar características petrofísicas para serem consideradas reservatórios ou selos apropriados para evitar que o CO₂ armazenado escape para a superfície (KETZER et al., 2016).

Entre as numerosas bacias sedimentares brasileiras, a Bacia do Paraná parece apresentar condições favoráveis para o armazenamento geológico de CO₂, sendo uma das

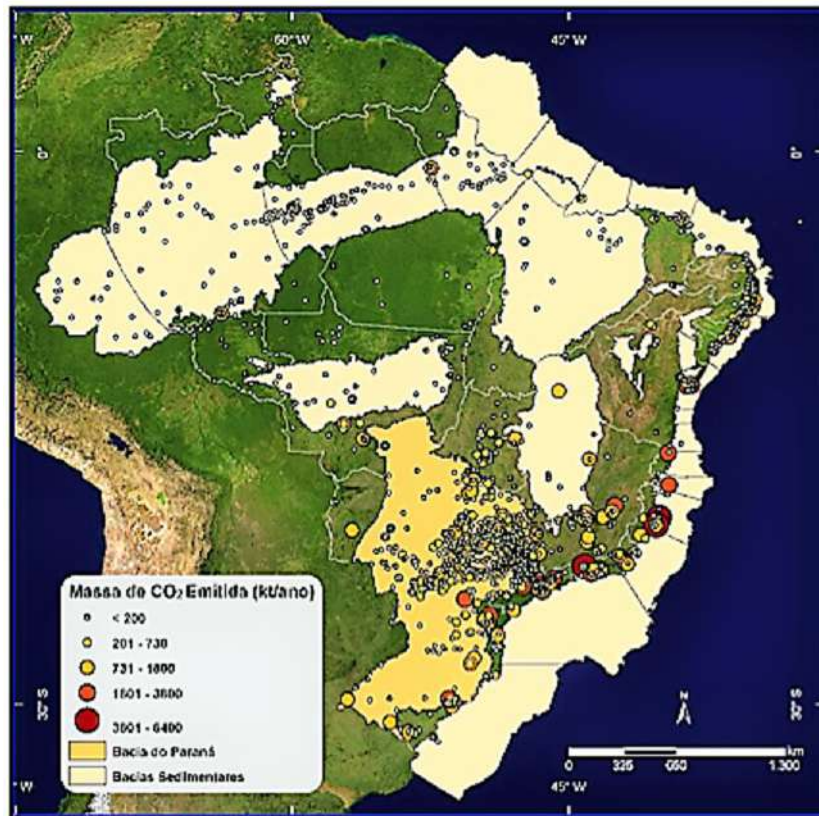


Figura 1 – Mapa de emissões de CO₂ (kt/ano) e localização das bacias sedimentares brasileiras. Fonte: Rockett et al. (2011).

principais condições sua proximidade com as fontes estacionárias de CO₂ nas regiões sul e sudeste do Brasil (Fig. 1). Outra condição relevante são os arenitos deltaicos da Formação Rio Bonito, os quais são considerados os melhores reservatórios da Bacia do Paraná. Isso se deve à porosidade presente com um valor médio de 10,92 %, até um valor máximo de 20 %, e as espessuras médias de até 270 m (Superintendência de Definição de Blocos, 2017; HOLZ et al., 2010; MORAES, 2017).

A Fm. Rio Bonito tem sido foco de várias investigações científicas devido aos seus recursos minerais energéticos, como o carvão mineral nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, e urânio no Estado do Paraná (BOCARDI et al., 2009; SCHNEIDER et al., 1974; ZACHARIAS, 2004; ZALÁN, 1990). Do ponto de vista do armazenamento geológico de CO₂ na fase supercrítica, a Fm. Rio Bonito pode ser considerada um reservatório viável devido aos valores consideráveis de porosidade e permeabilidade, profundidade superior ao mínimo requerido igual a 800 m e presença de aquíferos salinos que permitem a injeção de CO₂ para o seu armazenamento.

Outro elemento a considerar é a presença de formações que podem atuar como selante para a Fm. Rio Bonito e que podem impedir a migração de CO₂. A Formação Palermo, sobrejacente à Fm. Rio Bonito, em certas áreas da Bacia do Paraná, é composta

por siltitos, siltitos arenosos e argilitos, com espessuras próximas a 280 m (MILANI; ZALÁN, 1999). A segunda formação que recobre a Fm. Rio Bonito é a Formação Irati, que é composta principalmente por sequências espessas de folhelhos, siltitos e calcários dolomíticos, com espessura máxima de 71 m. Outras formações sobrejacentes são Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto, constituídas por argilitos, folhelhos e siltitos; argilitos e folhelhos; e siltitos e argilitos, respectivamente (SCHNEIDER et al., 1974). Em geral, todas as formações podem atuar como rochas selantes em um sistema de armazenamento de CO₂, principalmente devido ao seu alto teor de argilominerais e espessuras consideráveis.

1.1 Motivação

Um dos principais motores das mudanças climáticas é o aumento da concentração de GEE na atmosfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂). Por isso, nos próximos anos, torna-se crítica a implantação de diferentes métodos e técnicas para mitigar as emissões de GEE. Dentro dessas metodologias está o armazenamento geológico de CO₂, utilizando reservatórios com características específicas para o armazenamento efetivo do fluido. Na América do Sul, a Bacia do Paraná, destaca-se como uma bacia com potencial para o armazenamento de CO₂. A presente pesquisa se propõe a estudar as propriedades mineralógicas, químicas e petrofísicas de rochas sedimentares arenosas das formações Rio Bonito (Brasil) e San Miguel (Paraguai) da Bacia do Paraná com vistas a se analisar a factibilidade dessas formações para a estocagem e mineralização de CO₂.

1.2 Apresentação do problema

Nos últimos anos diversos esforços têm sido feitos para mitigar as emissões de CO₂ geradas por diferentes setores industriais e a sociedade cada vez mais crescente. Dentro desses esforços, as tecnologias de CCS/CCUS se estabelecem como uma solução promissora para capturar o CO₂ da atmosfera, gerado através de atividades antrópicas, e armazená-lo em formações geológicas de modo estável ou utilizá-lo em operações industriais.

Diferentes pesquisas sobre locais potenciais para a estocagem geológica de CO₂ ao redor do mundo têm sido desenvolvidas nas últimas décadas. No entanto, o crescimento relativamente recente na pesquisa das tecnologias de CCS/CCUS no Brasil tem permitido desenvolver um número limitado de estudos que analisaram formações geológicas em bacias brasileiras com potencial para a estocagem geológica e mineralógica de CO₂, sendo uns dos focos principais a Bacia do Paraná.

Dentro da Bacia do Paraná, a Fm. Rio Bonito já foi considerada como local potencial para a estocagem geológica de CO₂, porém sem a possibilidade da análise de amostras do interior da bacia. A Fm. San Miguel, unidade cronocorrelata paraguaia da

Fm. Rio Bonito, apresenta ausência de estudos focados na sua factibilidade como possível local para o armazenamento de CO₂ e pode servir de referência para avaliação de uma porção ainda não estudada em detalhe na bacia.

Para obter uma compreensão mais completa sobre a capacidade de armazenamento de CO₂ dos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel, é fundamental desenvolver uma pesquisa científica que considere aspectos geológicos, mineralógicos, químicos e petrofísicos. Concentrar-se no estudo desses aspectos permitirá entender a factibilidade de implementação de um ou mais projetos de tecnologias de CCS na Bacia do Paraná e poderia ajudar a desenvolver futuros estudos de locais potenciais em outras bacias sedimentares brasileiras.

Do contexto anteriormente detalhado emergem as seguintes perguntas científicas a serem abordadas neste projeto de pesquisa de mestrado:

- Quais semelhanças e diferenças sedimentológicas (litologia, espessura, cores) compartilham os arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel?
- A composição mineralógica dos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel é favorável para o armazenamento de CO₂?
- Os arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel apresentam características petrofísicas apropriadas para armazenar CO₂?
- Quais formações da Bacia do Paraná podem atuar como rocha selante dos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel para garantir a segurança no armazenamento de CO₂?
- Existem equivalentes sedimentares aos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel em projetos de armazenamento de CO₂ internacionais?
- Quais experiências de projetos internacionais de armazenamento geológico de CO₂ podem ser usadas no contexto brasileiro?

1.3 Objetivos

Esta investigação tem como objetivo principal a avaliação da factibilidade da estocagem de CO₂ em rochas sedimentares arenosas da Fm. Rio Bonito na Bacia do Paraná, Brasil, e da unidade equivalente, Fm. San Miguel, no Paraguai.

De forma mais estruturada, os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Levantar a composição sedimentológica e mineralógica das rochas arenosas das formações Rio Bonito e San Miguel em referências bibliográficas.

- Obter o perfil geofísico de rochas arenosas da Formação San Miguel amostradas no testemunho de sondagem ML-1, no Paraguai oriental, através do Multi Sensor Core Logger (MSCL), em termos de onda P, densidade gama, resistividade, susceptibilidade magnética, espectrofotômetro de cor e gama natural.
- Obter a composição química de rochas arenosas amostradas no testemunho de sondagem ML-1, através do MSCL, em termos de elementos como Fe, Ca e Mg.
- Reconhecer padrões litológicos baseados em dados mineralógicos, químicos e geofísicos das formações Rio Bonito e San Miguel.
- Estabelecer a comparação entre os dados mineralógicos, químicos e petrofísicos disponíveis das formações Rio Bonito e San Miguel.
- Detalhar a comparação entre propriedades sedimentológicas, mineralógicas e petrofísicas visando melhorar a identificação de corpos arenosos favoráveis à estocagem e mineralização de CO₂.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação de mestrado foi estruturada de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e está dividida da seguinte forma:

- (i) O primeiro capítulo é a Introdução, que aborda a delimitação do tema, os objetivos da pesquisa e outros elementos necessários para a apresentação do assunto em questão.
- (ii) O segundo capítulo é dedicado à revisão bibliográfica, no qual são discutidos os aspectos gerais das emissões de CO₂, os conceitos teóricos relacionados ao armazenamento geológico de CO₂ e os elementos da geologia regional e local, com foco na Bacia do Paraná e as formações Rio Bonito e San Miguel.
- (iii) No terceiro capítulo, são detalhados os materiais e a métodos utilizados ao longo da pesquisa. Isso inclui o levantamento bibliográfico, levantamento de fontes estacionários de CO₂, dados de testemunho e as análises laboratoriais das amostras das formações de interesse. Também são apresentados os conceitos teóricos das técnicas analíticas utilizadas nesta pesquisa.
- (iv) O quarto capítulo expõe os resultados juntamente com as interpretações correspondentes desenvolvidas nesta pesquisa.
- (vi) O sexto capítulo discute as implicações para o armazenamento geológico de CO₂ nas formações e regiões de estudo.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos gerais sobre a emissão antropogênica de CO₂

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas da ONU (IPCC, em inglês), em 2018 estima-se que a temperatura global chegará a 1,5 °C entre 2030 e 2052, podendo atingir até 2 °C, se não forem reduzidas as emissões de GEE para a atmosfera antes de 2050. Em muitas regiões do planeta, o aquecimento tem sido superior à média mundial anual, afetando principalmente a região ártica, com um aquecimento entre o dobro e o triplo do previsto. O maior efeito do aquecimento global gerado pelas emissões antropogênicas é evidenciado nas mudanças no sistema climático, sendo a elevação do nível do mar um marcador evidente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018).

Em 2016, as emissões antrópicas atingiram 49,4 bilhões de toneladas de CO₂ equivalente, sendo o setor de energia o maior gerador com 73,2 % (Fig. 2). Além disso, os setores ligados a resíduos, indústria, emissões fugitivas da produção de energia, combustão de combustível não alocado, uso de energia em edifícios, e uso de energia na indústria produziram ao redor de 63,7 % dos GEE, sendo tais setores considerados fontes estacionárias de emissões (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2020).

Em relação às emissões globais de CO₂, o Brasil só gera ao redor de 1,3 % das emissões. No entanto, o país destaca-se como o maior emissor na América do Sul, produzindo 476 toneladas de CO₂ em 2017 (Fig. 3) (RITCHIE; ROSER; ROSADO, 2020).

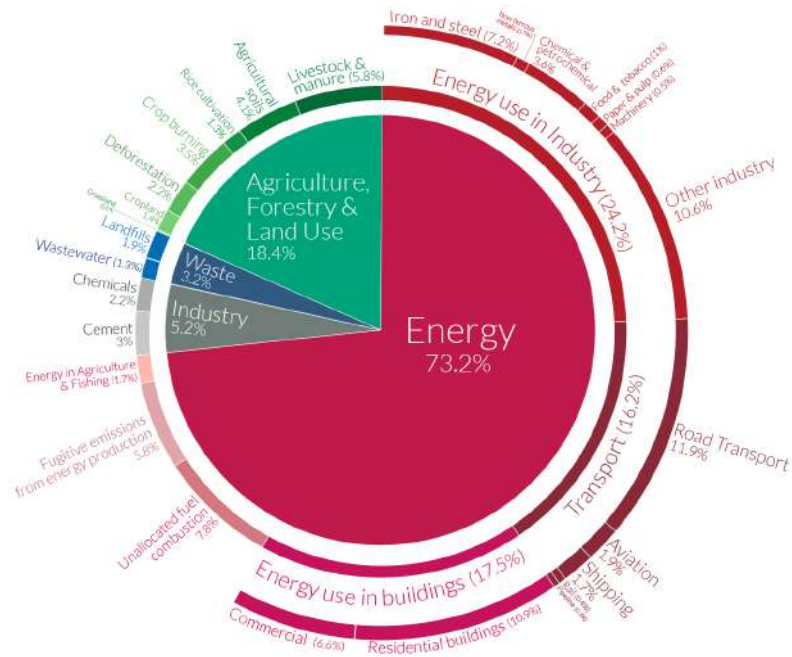


Figura 2 – Emissões globais de Gases de Efeito Estufa por setor em 2016. Fonte: Ritchie, Roser e Rosado (2020).

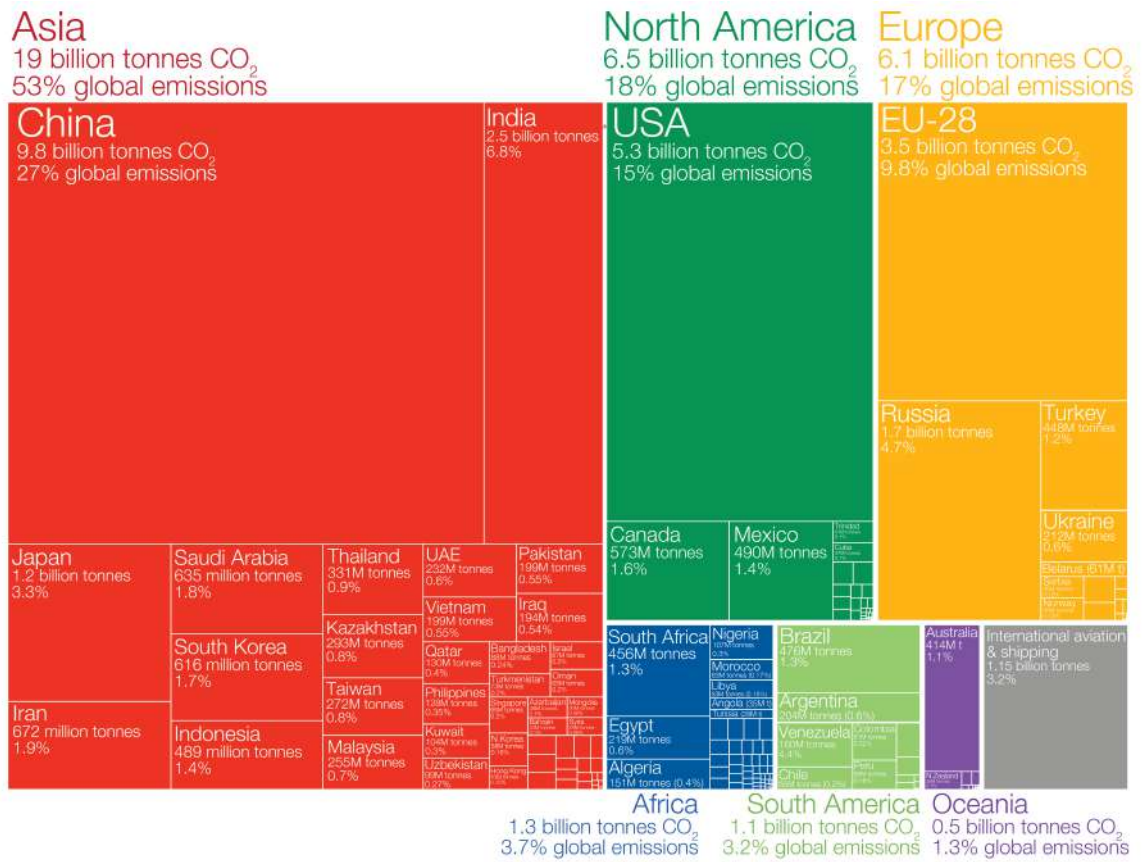


Figura 3 – Emissões globais de CO₂ em 2017. Fonte: Ritchie, Roser e Rosado (2020).

No contexto brasileiro, o país tem conseguido diminuir suas emissões totais desde o século passado, principalmente devido à criação, em 2004, do Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal (MELLO; ARTAXO, 2017). Apesar dessas medidas e os esforços em outros setores, o Brasil emitiu um valor bastante significativo de 2,16 Gt de CO₂ equivalente em 2020 (Fig. 4) a partir da contribuição de várias unidades da federação (Fig. 5) (Observatório do Clima, 2020). Observa-se que tais emissões estão principalmente vinculadas às mudanças de uso da terra e florestas, com os estados do bioma Amazônia (região do arco do desmatamento) sendo os maiores emissores.

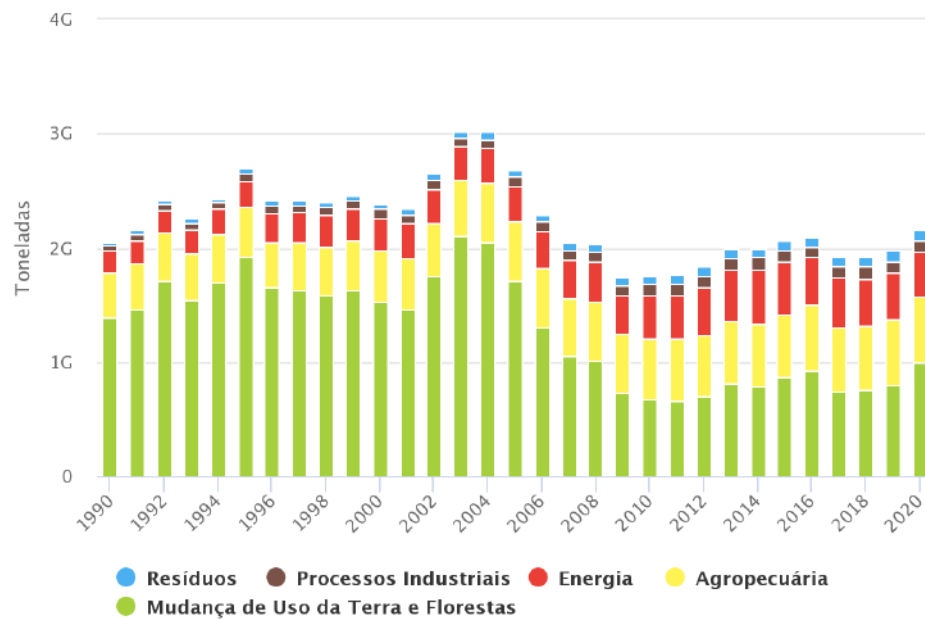


Figura 4 – Emissões totais de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2020. Fonte: Observatório do Clima (2020)

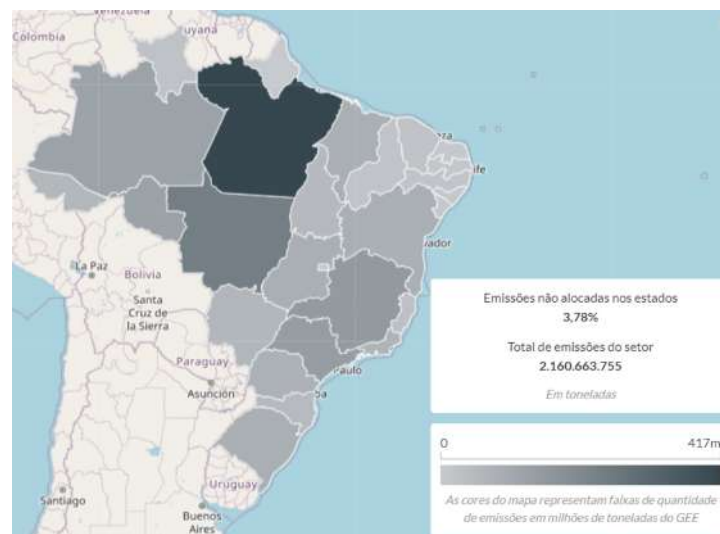


Figura 5 – Distribuição de emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil em 2020 por Unidade Federativa. Fonte: Observatório do Clima (2020)

Contudo, o setor energético brasileiro contribui de forma significativa e crescente com as emissões de CO₂ no país, apresentando um aumento de 104 % nas emissões de GEE desde os anos 90 (Fig. 4). Em relação à distribuição das emissões de GEE geradas pelo setor de energia, o Estado de São Paulo produz ao redor de 75,5 Mt de CO₂ equivalente, sendo o principal estado gerador com grande diferença ao ser comparado com o segundo estado gerador, o Rio de Janeiro, o qual emitiu 47,5 Mt de CO₂ equivalente em 2020 (Fig. 6) (Observatório do Clima, 2020).

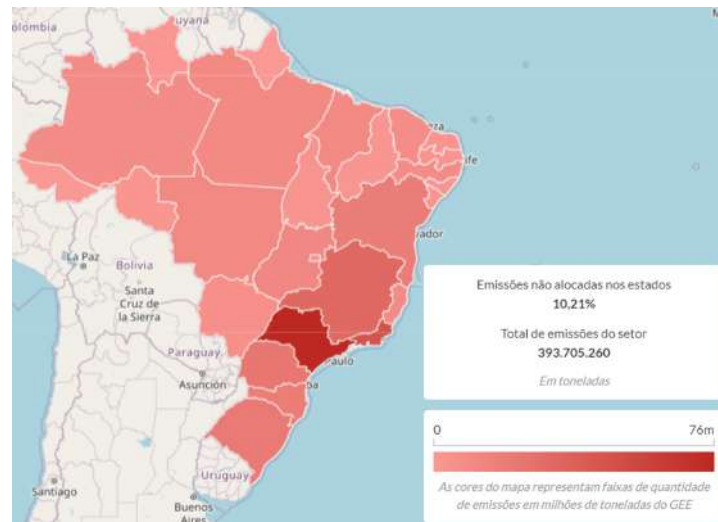


Figura 6 – Distribuição de emissões de Gases de Efeito Estufa do setor energético brasileiro em 2020. Fonte: Modificado de Observatório do Clima (2020).

Dessa forma, diversas medidas estão sendo estudadas e aplicadas para reduzir a contribuição dos diferentes setores, incluindo o uso de energias renováveis e tecnologias de CCS. No entanto, estima-se que a implementação de energias renováveis não será suficiente para atender à procura de energia e, portanto, não permitiria reduzir as emissões de GEE até o nível requerido (FISCHER et al., 2010; PACALA; SOCOLOW, 2004; VOORMEIJ; SIMANDL, 2004). Inclusive, para o ano 2070, estima-se que as tecnologias de CCS contribuirão com até 15 % da redução das emissões, com o armazenamento geológico de CO₂ sendo o destino de 90 % do conteúdo capturado (International Energy Agency, 2021). Para o Brasil o uso das tecnologias de CCS contribuiria positivamente a atingir as metas de reduzir as emissões de GEE em 48 % até 2025 e 53 % até 2030, em relação às emissões de 2005, metas conhecidas como Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, em inglês) assinadas no Acordo de Paris de 2015 e atualizadas em 2023 (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2023).

2.2 Armazenamento geológico de CO₂

Pode se definir o sequestro geológico de CO₂ como o processo no qual o fluido é armazenado em rochas ou estruturas geológicas subterrâneas porosas e permeáveis através de mecanismos de armadilhas que deveriam aprisionar o CO₂ por longos períodos de tempo, inclusive atingindo escalas de até 10.000 anos se a armadilha for mineral (AJAYI; GOMES; BERA, 2019; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005). Esse processo requer uma avaliação que integre diversos fatores em termos da geologia regional e local, tectônica, propriedades geoquímicas, petrofísicas e mineralógicas dos reservatórios e rochas selantes, mecanismos de armadilhas, e estudos de viabilidade econômica e de percepção pública (ZHAOFENG et al., 2011).

Normalmente, o CO₂ é injetado no reservatório na fase supercrítica, i.e., quando o fluido atinge pelo menos uma temperatura de 31,1°C e uma pressão de 7,38 MPa, sendo tais condições normalmente possíveis a uma profundidade mínima de 800 m (Fig. 7) (HOLLOWAY; SAVAGE, 1993). Essa abordagem é geralmente usada porque apresenta uma maior eficiência na utilização do espaço poroso do reservatório, já que nesse estado o CO₂ é mais denso do que o CO₂ gasoso (ZHANG; SONG, 2014). No entanto, nas últimas décadas se desenvolveram diferentes métodos para controlar a mobilidade do CO₂ em diferentes estados (gás, líquido), permitindo obter uma melhor adaptabilidade durante o processo de armazenamento dependendo, principalmente, das condições do reservatório ou limitações ambientais (AL-SHARGABI et al., 2022).

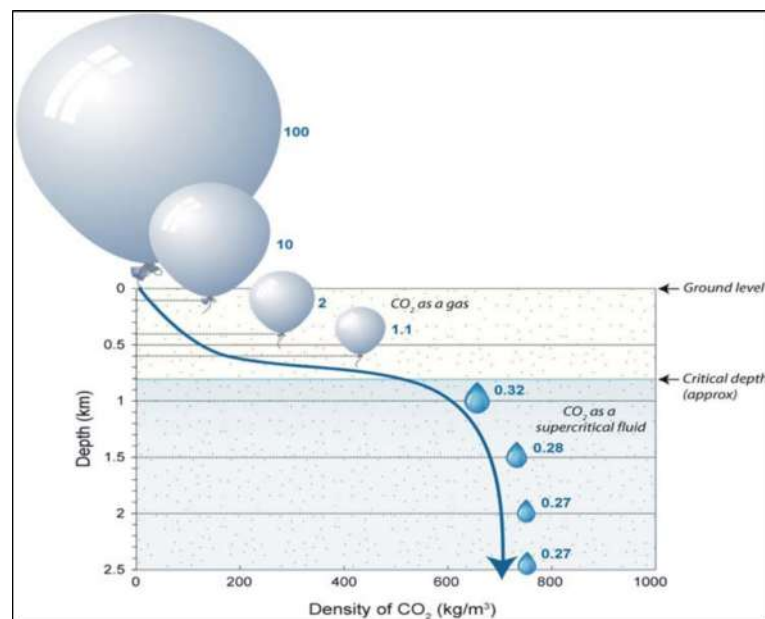


Figura 7 – Variação da densidade do CO₂ em relação à profundidade. Fonte: Menacherry et al. (2009).

A maioria dos sistemas geológicos de armazenamento de CO₂ são compostos de pelo

menos uma rocha reservatório e outra selante. Essa última deve ser pouco permeável para não permitir que o fluido escape para a superfície, sendo rochas silicáticas de granulação fina, evaporíticas e rochas com alto teor de matéria orgânica as selantes mais efetivas (OLABODE; RADONJIC, 2013). Além disso, a camada selante deve ser extensa, espessa e dotada de plasticidade; essa última condição é necessária para que a rocha não perca sua condição de selante mesmo sob pressão (THOMAS et al., 2004).

Os mecanismos de interação entre a rocha reservatório, a rocha selante e o CO₂ geram armadilhas que permitem o armazenamento do fluido. Normalmente, mais de um mecanismo é utilizado dependendo da escala de tempo e do comportamento dinâmico do fluxo de CO₂. Com o aumento do tempo, o mecanismo de armazenamento dominante mudará e tipicamente a segurança de armazenamento também aumenta (Fig. 8). Dessa forma, a partir da injeção de CO₂ na rocha, os tipos de mecanismos usados nas primeiras etapas de armazenamento são as armadilhas estruturais e estratigráficas, passando pelas residuais e de solubilidade e finalmente, as armadilhas minerais, as quais permitem o sequestro de CO₂ em até 10.000 anos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005).

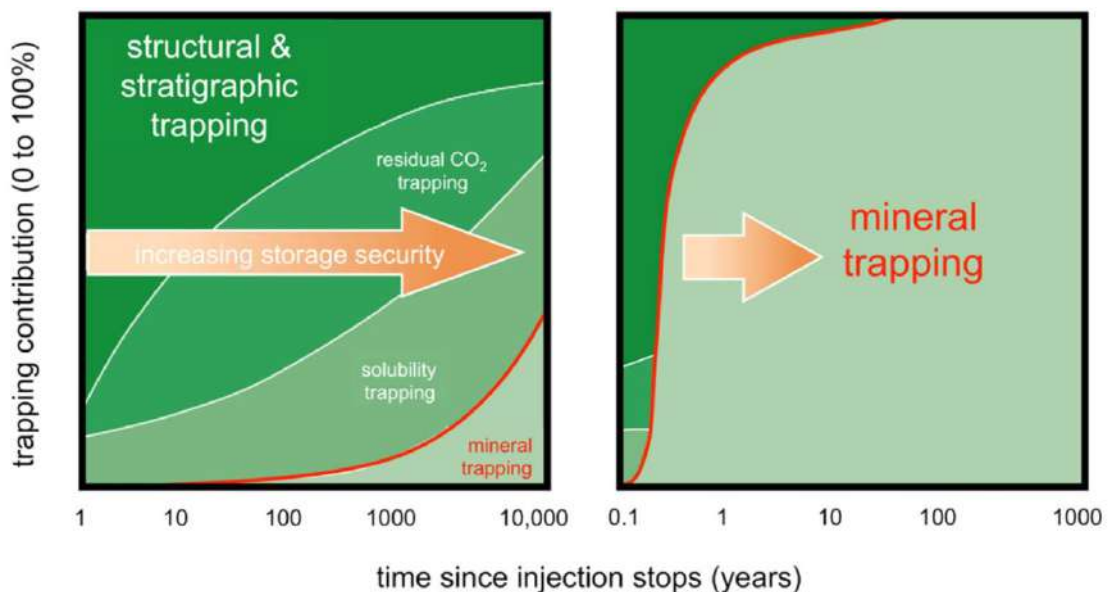
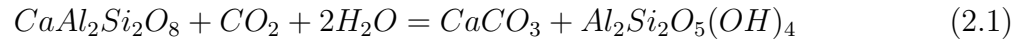


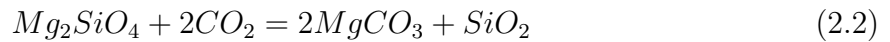
Figura 8 – Evolução da extensão dos mecanismos de captura de CO₂ com o tempo. A extensão de cada mecanismo de armadilha é altamente específica do local e depende de vários parâmetros, incluindo o tipo de rocha: rochas carbonáticas e siliciclásticas (painel esquerdo), ou rochas máficas e ultramáficas que têm a capacidade de reagir muito mais rapidamente com CO₂ para formar carbonatos (painel direito). Fonte: Kelemen et al. (2019)

No caso dos arenitos, a mineralização é produzida pela interação de água acidificada por CO₂ com feldspatos e argilominerais presentes na rocha, fornecendo cátions (Ca²⁺, Mg²⁺ e Fe²⁺) que podem precipitar como carbonatos. Portanto, a capacidade de sequestro

de CO_2 dependerá da quantidade de minerais reativos que fornecem Ca, Mg e Fe (BACHU; GUNTER; PERKINS, 1994; GUNTER; PERKINS; MCCANN, 1993). Um exemplo da formação de carbonatos é através da interação do CO_2 com a anortita:



Os carbonatos também são produzidos através da reação do CO_2 com a forsterita:



Assim, o armazenamento mineral de CO_2 influencia diretamente na porosidade e permeabilidade da rocha de armazenamento e permite a estocagem permanente e estável de CO_2 (BACHU; GUNTER; PERKINS, 1994).

Existem diferentes opções para o armazenamento de CO_2 (Fig. 9), sendo divididas em: (i) reservatórios depletados de petróleo e gás; (ii) uso de CO_2 na recuperação avançada de petróleo; (iii) formações de aquíferos salinos; (iv) camadas de carvão profundas não exploráveis; (v) uso de CO_2 na recuperação de metano de camadas de carvão; (vi) basaltos; (vii) folhelhos betuminosos; e (viii) cavidades geológicas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2005).

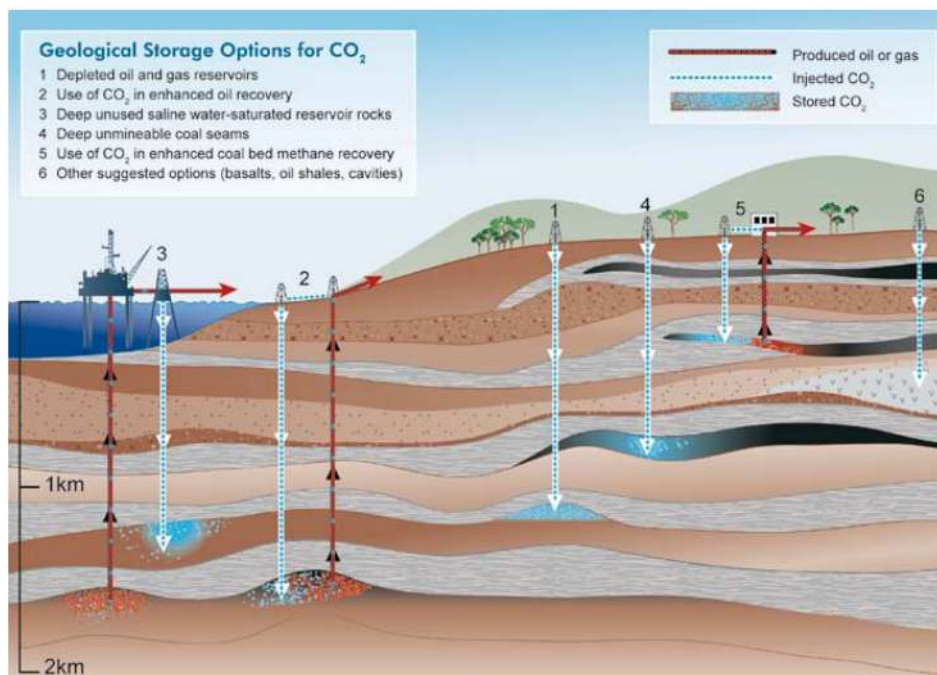


Figura 9 – Opções para armazenamento de CO_2 em formações geológicas subterrâneas profundas. Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change (2005)

Das opções existentes, destacam-se as décadas de experiência da indústria do petróleo na injeção de CO_2 em rochas reservatórios como método de recuperação terciária de hidrocarbonetos em campos maduros (Fig. 9). Utilizando esse conhecimento junto

com novos estudos e projetos em desenvolvimento relacionados a CCS, torna-se viável a implantação dessas tecnologias como forma de mitigar as mudanças climáticas em larga escala e no longo prazo (AJAYI; GOMES; BERA, 2019). No entanto, o armazenamento geológico dedicado de CO₂ em reservatórios depletados de petróleo e gás permite o aprisionamento do fluido de forma mais estável, diminuindo o risco de fuga de CO₂ para a superfície, o que pode acontecer quando o fluido é utilizado na recuperação avançada de petróleo, que permite o escape de conteúdos relativamente irrisórios de CO₂ para a atmosfera através dos testemunhos de produção ou injeção dependo do tipo de técnica de injeção usada (AL-SHARGABI et al., 2022; BACHU; GUNTER; PERKINS, 1994).

Atualmente, existem 28 instalações comerciais de CCS em operação em todo o mundo com uma capacidade de 34,503 a 38,861 milhões de toneladas por ano de CO₂ (MtpaCO₂) (Global CCS Institute, 2021; MATTER et al., 2016; The University of Edinburgh, 2015; VARGAS-GUZMÁN; SANT'ANNA, 2023). Até 2030, esses níveis devem aumentar para 147,2 MtpaCO₂ graças à conclusão dos projetos atualmente em desenvolvimento (Global CCS Institute, 2021). Dentro desses projetos em desenvolvimento, 79 projetos dedicados ao armazenamento geológico deverão aumentar significativamente os conteúdos capturados de CO₂, pois atualmente só 8 projetos em operação são destinados a esse tipo armazenamento (Global CCS Institute, 2021). Dessa forma, é notável que os países estão fazendo maiores esforços para sequestrar CO₂ de forma mais estável através do armazenamento dedicado, ao invés de priorizar a utilização do fluido para a recuperação avançada de petróleo.

2.3 Bioenergia com Captura e Armazenamento de CO₂

A Bioenergia com Captura e Armazenamento de CO₂ (BECCS) refere-se à utilização de tecnologias de CCS em processos nos quais a biomassa é transformada em combustíveis ou queimada diretamente para produzir energia. A Bioenergia com Captura e Armazenamento de CO₂ (BECCS) é uma técnica única de remoção de CO₂ que, simultaneamente, tem a capacidade de fornecer energia. Devido à capacidade da bioenergia de gerar calor em alta temperatura e produzir combustíveis compatíveis com motores existentes, a BECCS desempenha um papel crucial na descarbonização de setores como a indústria pesada, aviação e transporte rodoviário (International Energy Agency, 2023).

Atualmente, aproximadamente 2 Mt de CO₂ biogênico são capturados anualmente, principalmente em aplicações de bioetanol. Desde janeiro de 2022, foram anunciados planos para cerca de 20 instalações que, juntas, capturariam aproximadamente 15 Mt de CO₂ por ano de emissões biogênicas. Com base nos projetos em estágios iniciais e avançados de implantação, estima-se que a remoção de carbono por meio da BECCS poderia alcançar pouco menos de 50 Mt de CO₂ por ano até 2030 (International Energy

Agency, 2023).

2.4 Contexto geológico

2.4.1 Bacia do Paraná

A Bacia do Paraná estende-se desde a região centro-sul do Brasil até os países vizinhos: Paraguai, Uruguai e Argentina (Fig. 10) (ZALÁN, 1990), atingindo uma área total de 1.400.000 km².

A Bacia do Paraná é descrita como uma bacia intracratônica formada por rochas sedimentares e vulcânicas com idades compreendidas entre o Ordoviciano e o Cretáceo (ZALÁN, 1990). A evolução estrutural da bacia originou-se a partir de um rift Neo-Ordoviciano até se desenvolver em uma típica bacia intracratônica. A bacia é alongada na direção geral N-S, com espessura máxima preservada na porção centro-oeste, atingindo os 7.000 m de espessura, dos quais 5.500 m são depósitos sedimentares (Figs. 10, 11).

As características estruturais mais proeminentes da bacia são os arcos regionais de Ponta Grossa e Rio Grande no Brasil e do Arco de Assunção no Paraguai. Estruturas rúpteis (falhas e fraturas) com direções NW-SE e NE-SW seccionam a pilha sedimentar em várias áreas (Superintendência de Definição de Blocos, 2017).

A sequência Permiana-Carbonífera é a pilha sedimentar mais espessa (até 2500 m) com uma ampla gama de ambientes de deposição, incluindo depósitos continentais que foram parcialmente influenciados por geleiras e depósitos marinhos rasos. Esta sequência registra o início da reorganização estrutural Permiana da Bacia do Paraná como resultado da Orogenia Sanrafaélica e inclui a Fm. Rio Bonito no Brasil e a Fm. San Miguel no leste do Paraguai (MILANI; RAMOS, 1998).

2.4.2 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito, de idade Sacmariano-Artinsquiano (Eopermiano), faz parte do Grupo Guatá, depositado sobre o Grupo Itararé (Figs. 11, 12, 13) (SCHNEIDER et al., 1974; ZALÁN, 1990). A Fm. Rio Bonito está localizada a profundidade de soterramento em torno de 3000 m, mas pode chegar até 4000 m na parte mais profunda da bacia (Fig. 14)(BOCARDI et al., 2009). A formação apresenta espessura máxima de aproximadamente 350 m (Fig. 15) (ZALÁN, 1990). É preciso mencionar que no Estado de São Paulo (SP), região nordeste da Bacia do Paraná, as formações Rio Bonito e Palermo são equivalentes à Fm. Tatuí (Fig. 12) (HOLZ et al., 2010; ZACHARIAS, 2004).

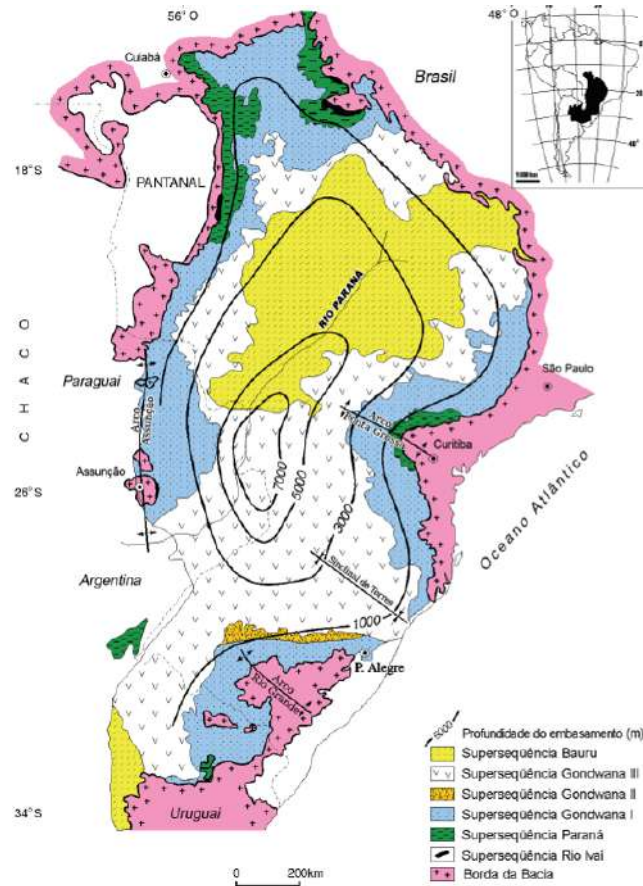


Figura 10 – Localização da Bacia do Paraná, mostrando as profundidades do embasamento e as superseqüências sedimentares. Fonte: Milani, França e Medeiros (2007)

A Formação Rio Bonito consiste de rochas psamíticas e pelíticas (arenitos, siltitos, conglomerados e, secundariamente, folhelhos, argilitos e calcários) depositadas em ambientes fluvial, deltaico e marinho raso (ZALÁN, 1990). As estruturas sedimentares mais representativas da Fm. Rio Bonito são a estratificação planar e a estratificação paralela planar (SCHNEIDER et al., 1974). Também é observada a presença de contribuição vulcânica na formação (SANT'ANNA et al., 2006).

Os arenitos deltaicos da Fm. Rio Bonito são considerados os melhores reservatórios da Bacia do Paraná. Isso se deve à porosidade presente com um valor médio de 10,92 %, até um valor máximo de 20 %, e as espessuras médias de até 270 m (Superintendência de Definição de Blocos, 2017; HOLZ et al., 2010; MORAES, 2017).

Além das características de reservatório da Fm. Rio Bonito, essa unidade tem sido foco de várias investigações científicas devido aos seus recursos minerais energéticos como o carvão mineral nos estados de Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, e urânio no Estado do Paraná (ZACHARIAS, 2004). Dessa forma, a Fm. Rio Bonito já foi bem descrita em diferentes estudos em relação às características petrofísicas, mineralógicas e de fluidos, ambientes de deposição, tipo de estratificação, entre outros aspectos (BOCARDI et

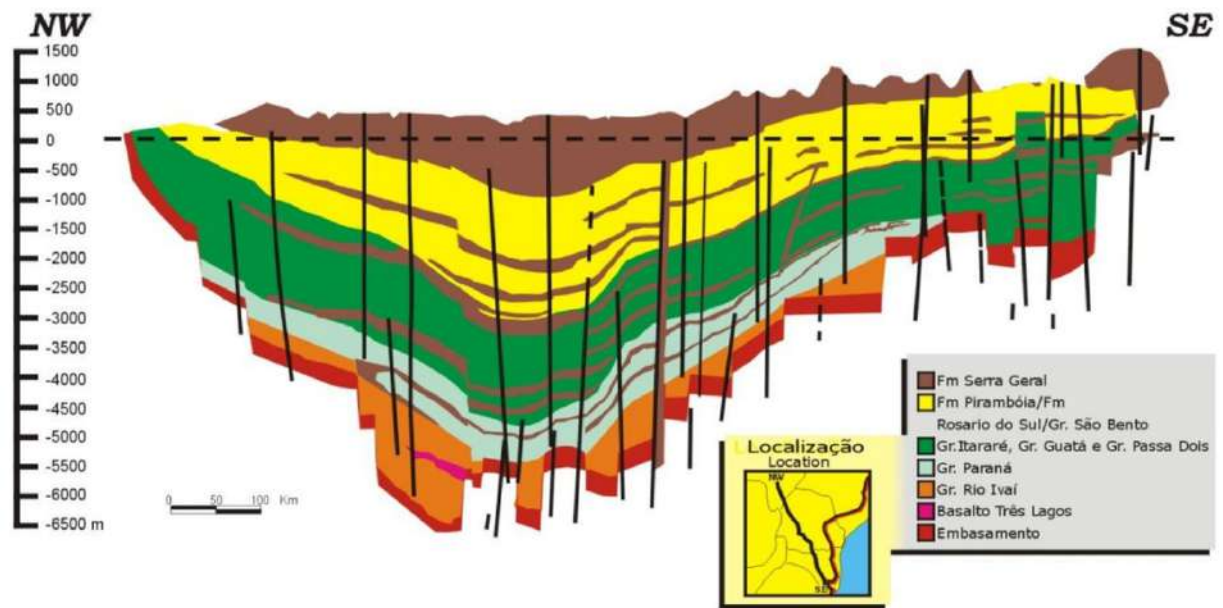


Figura 11 – Seção geológica esquemática da Bacia do Paraná. A Formação Rio Bonito faz parte do Grupo Permiano Guatá. Fonte: Superintendência de Definição de Blocos (2017)

al., 2009; SCHNEIDER et al., 1974; ZALÁN, 1990). Também destacam-se recentes estudos sobre a Fm. Rio Bonito como prospecto para o armazenamento de CO₂ (OLIVEIRA et al., 2023; ABRAHAM-A et al., 2024a; ABRAHAM-A et al., 2024b).

Schneider et al. (1974) descreveram a Fm. Rio Bonito, desde o nordeste do Estado de SP até o sudeste de Santa Catarina. Os autores propuseram a divisão da formação em três membros: Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis (Fig. 13). O Membro Triunfo, que compreende a porção basal da formação, é constituído de rochas arenosas, principalmente, de arenitos com estratificação cruzada, planar e acanalada, depositados em ambiente flúvio-deltaico. O Membro Paraguaçu recobre de forma concordante o Membro Triunfo, e é composto de siltitos e folhelhos cinza, intercalados com arenitos finos e leitos de rochas carbonáticas depositados em ambiente marinho. Laminação paralela é a estrutura sedimentar dominante nos siltitos e folhelhos. Na porção superior da Fm. Rio Bonito está localizado o Membro Siderópolis que consiste em camadas de arenitos intercaladas com leitos de argilitos e folhelhos carbonosos depositados em ambiente marinho litorâneo. Laminação plano-paralela e ondulada predominam neste intervalo. Os contatos inferior com o Membro Paraguaçu e superior com a Fm. Palermo são concordantes.

Zalán (1990) estudou os elementos tectônicos que influenciaram o desenvolvimento da Fm. Rio Bonito. Os autores propuseram a existência de dois grandes depocentros paralelos ao Arco da Assunção na parte oeste da Bacia de Paraná (Fig. 15). Tais depocentros são uma resposta deposicional à elevação significativa da margem da bacia relacionada com a Orogenia Tardihercíniana. Também observa-se um depocentro menor

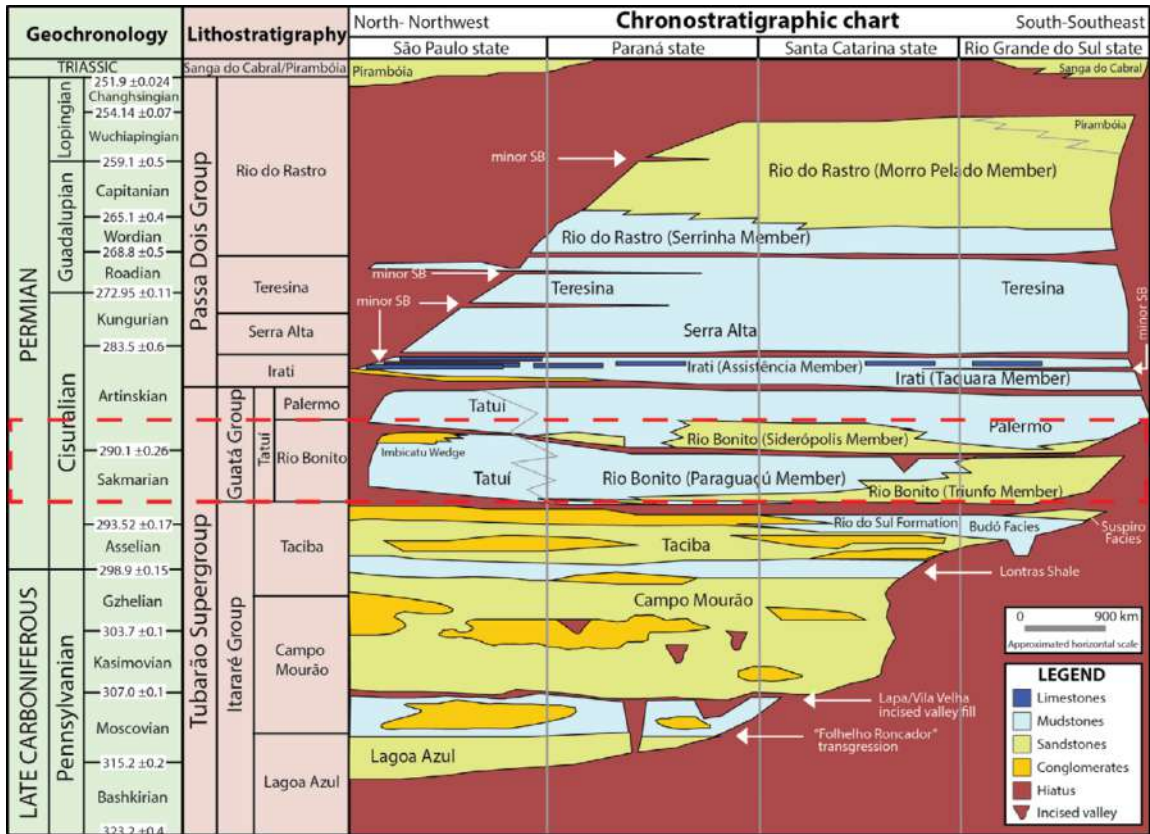


Figura 12 – Coluna cronoestratigráfica da sucessão Carbonífero Tardio-Eopermiano da borda leste da Bacia do Paraná. O intervalo da Fm. do Rio Bonito é realçado pelo retângulo de linha tracejada vermelha. Fonte: Modificado de Maahs et al. (2019)

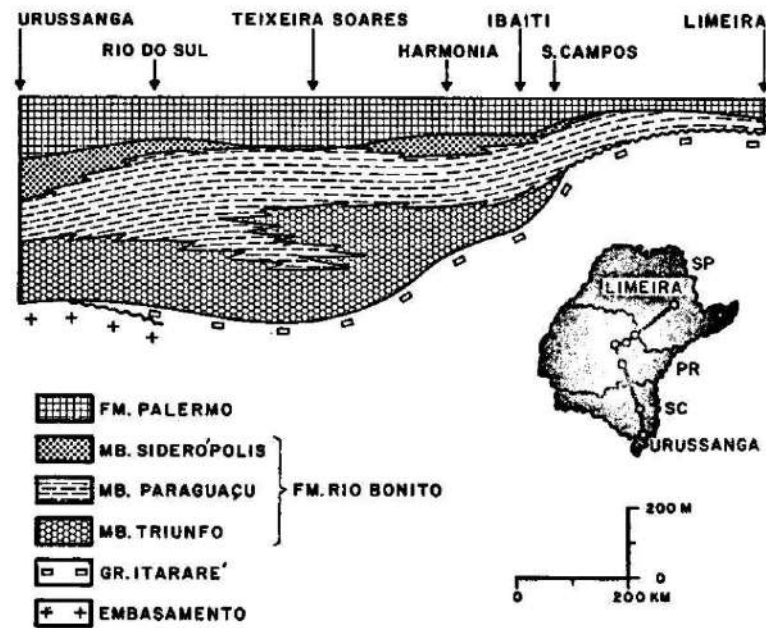


Figura 13 – Relações estratigráficas do Grupo Guatá. Fonte: Modificado de Schneider et al. (1974)

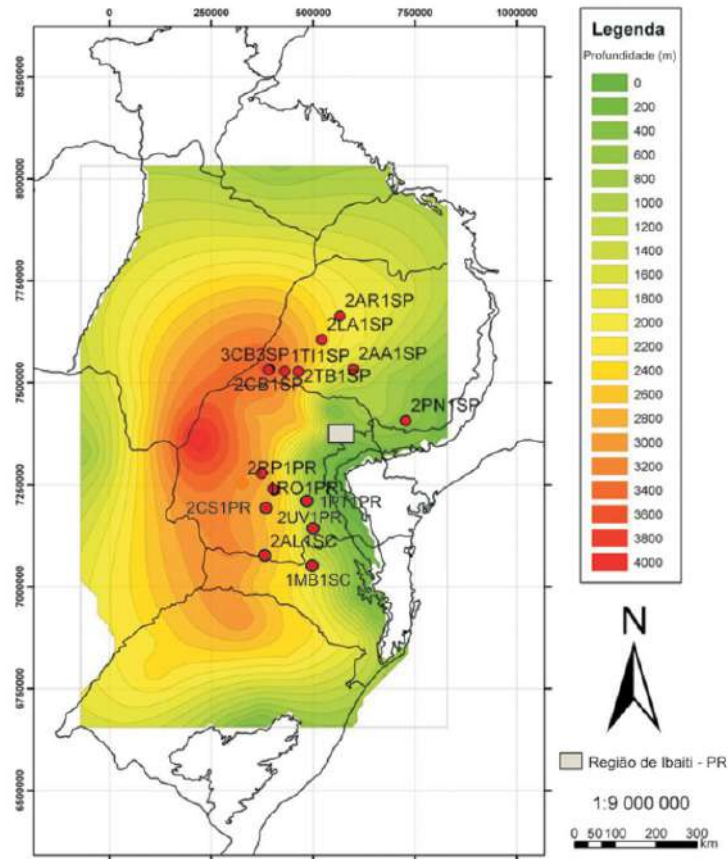


Figura 14 – Modelo de profundidades da Fm. Rio Bonito na Bacia do Paraná. Fonte: Bocardi et al. (2009)

na região sudeste da bacia, perto de Florianópolis. Além disso, a Fm. Rio Bonito está fortemente controlada por elementos tectônicos de orientação NE, especialmente na parte leste da bacia ao longo da zona de falha de Lancinha-Cubatão. Grandes lóbulos deltaicos são controlados por este elemento.

Bocardi et al. (2009) estudaram amostras e testemunhos da Fm. Rio Bonito e do Grupo Itararé, localizados nos estados de São Paulo, Paraná e Santa Catarina com o propósito de estabelecer sistemas deposicionais, constituintes diagenéticos e história de soterramento. Destacam-se as seguintes conclusões desses autores: (i) a profundidade máxima de soterramento da Fm. Rio Bonito foi de aproximadamente 4.000 m; e (ii) na profundidade de soterramento de 3.000 m, a porosidade atinge de 20 %.

Oliveira et al. (2023) conduziram uma pesquisa focada nos membros da Fm. Rio Bonito, localizados na Bacia do Paraná, em relação ao armazenamento de CO₂. Identificou-se a Fm. Rio Bonito como promissora, apresentando pares de rochas reservatório-selante com espessuras e profundidades adequadas para o aprisionamento estratigráfico de CO₂. A análise tridimensional de dados estratigráficos permitiu a delimitação de uma área favorável de 383.951 km² para o armazenamento geológico de CO₂ na Bacia do Paraná. Os autores

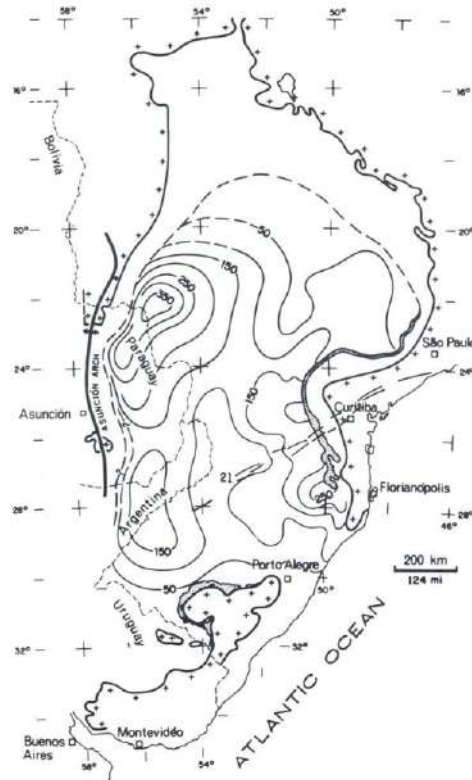


Figura 15 – Mapa de isópacas da Fm. Rio Bonito. Contornos em metros. Fonte: Zalán (1990)

concluíram que a região possui potencial para mitigar cerca de 12,1 bilhões de toneladas de CO_2 até 2050, considerando um reservatório com pelo menos 7.250 km^2 de extensão, 20 m de espessura, porosidade de 10 %, densidade de dióxido de carbono supercrítico de 840 kg/m^3 , pressão hidrostática de 10 MPa/km e gradientes de temperatura de $24,4 \pm 2,1$ $^\circ\text{C}/\text{km}$. Este contexto parece estar em sintonia com as características identificadas na Fm. Rio Bonito.

Abraham-A et al. (2024a) desenvolveram um estudo realizado no Estado de São Paulo que apresenta avaliações de viabilidade de hidrocarbonetos e perspectivas para armazenamento de CO_2 , com foco nas unidades de arenito da Fm. Rio Bonito. Das análises petrofísica e geoquímica, os autores sugerem que a Fm. Rio Bonito configura um sistema petrolífero no sudoeste do Estado de São Paulo com a presença de bitumem em amostras de rochas. Embora alguns poços apresentem indicações de gás em profundidades inadequadas para armazenamento de CO_2 , outros indicam unidades de hidrocarbonetos viáveis. Também, se apresenta um modelagem 3D das áreas com maior potencial para injeção de CO_2 e armazenamento geológico dedicado. O estudo destaca a importância de considerar as propriedades de interação rocha-fluido e o fluxo multifásico para uma gestão eficaz do armazenamento de CO_2 , com implicações tanto para a produção de hidrocarbonetos quanto para o armazenamento de CO_2 na Formação Rio Bonito.

O estudo conduzido por Abraham-A et al. (2024b) investigou as propriedades físicas das unidades rochosas associadas à Fm. Rio Bonito, com ênfase na modelagem da qualidade do reservatório por meio de parâmetros derivados da petrofísica, visando avaliar o potencial de armazenamento de CO₂. A pesquisa abrange a modelagem das profundidades e espessuras do reservatório, indicadores de zona de fluxo e permeabilidade efetiva, destacando os fatores de eficiência específicos para o armazenamento de CO₂ nas unidades rochosas da região estudada. Os resultados revelaram permeabilidades efetivas variando de 200 mD a mais de 2000 mD, com indicadores de zona de fluxo variando de 1,0 mm a 13,0 mm nas áreas cobertas pelos poços perfurados. Além disso, identificou-se unidades de arenito com espessuras de até 20 m, funcionando como unidades permeáveis que suportam a injeção e circulação de CO₂ na Fm. Rio Bonito para a região de São Paulo. A pesquisa também observou que em determinadas áreas do sudeste de São Paulo, a Fm. Rio Bonito pode ser encontrada em profundidades inferiores a 800 m, enquanto em outras partes, as profundidades variam de 950 m a 3500 m. Por fim, destaca-se que a presença de camadas finas pode impactar a integridade das rochas como potenciais locais de armazenamento ou rochas selantes/armadilhas/sobrecargas para o sequestro de CO₂. No entanto, os autores propõem que as unidades híbridas de reservatórios de CO₂ podem ser viáveis, especialmente em áreas onde camadas finas de siltstone estão intercaladas entre as unidades de arenito, proporcionando espessuras consideráveis de acordo com os padrões de armazenamento de CO₂.

2.4.3 Formação San Miguel

A Formação Permiana San Miguel está localizada na região leste do Paraguai e forma parte da Bacia do Paraná. Devido à presença de basaltos que cobrem grande parte da bacia nesta região paraguaia, localmente denominada Departamento Alto Parana, a formação se manteve pouco explorada. No entanto, entre 1981 e 1982, a empresa Pecten perfurou os poços exploratórios Asunción N° 1 (ASU-1) e N° 2 (ASU-2) no Bloco Lima com mostras de óleo reportadas nos arenitos devonianos da Formação Ponta Grossa. Posteriormente, em 1990, a empresa Texaco utilizou como referência os poços ASU-1 e ASU-2 para o desenvolvimento do poço ML-1, localizado a sudeste dos poços Asunción, no levantamento geológico da área de Mallorquín (KOVACS, 1990). Em 1994, o operador Guarani Exploration & Development Corp. desenvolveu a perfuração de dois poços, Ines G-1 (IG-1) e IG-2, com a finalidade de atingir o Arenito C da Fm. San Miguel. A localização dos poços ML-1, IG-1 e IG-2 pode ser visualizada na Fig. 16.

A Formação San Miguel consiste de rochas pelíticas (folhelhos e siltitos) e rochas psamíticas, principalmente arenitos e diamictitos (ORUÉ, 1996 apud THORNBURG; THOMAS; JOHANSEN, 1993). Também foram observadas contribuições vulcânicas na formação (SANT'ANNA et al., 2006). A formação foi depositada em ambientes

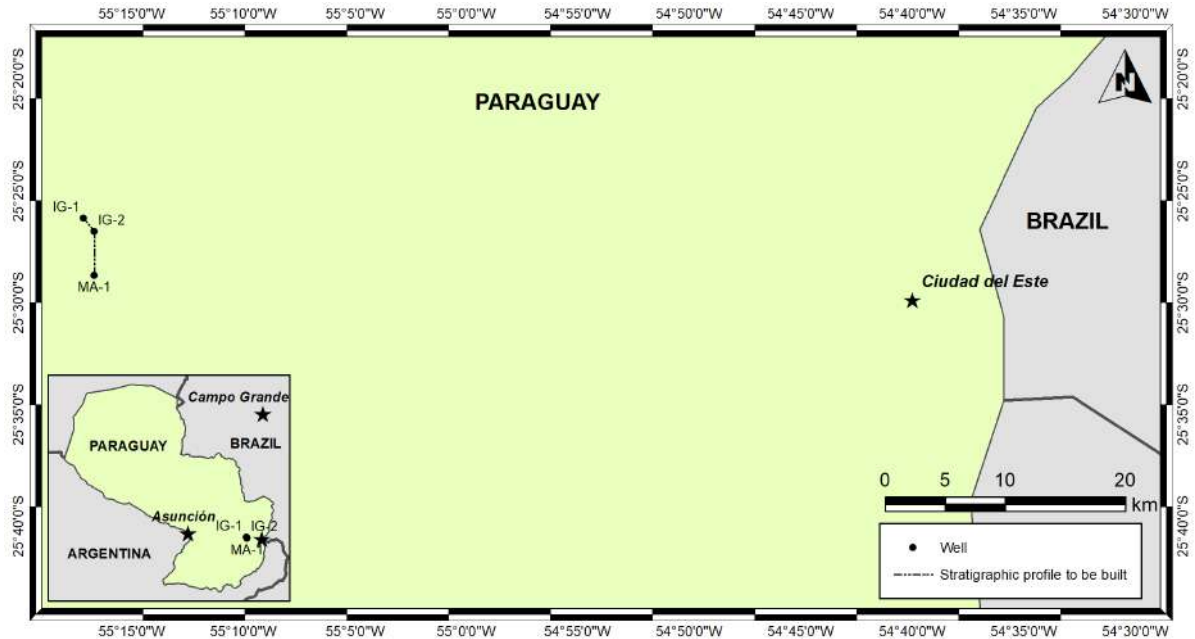


Figura 16 – Localização dos poços Mallorquín N° 1, Ines G-1 e Ines G-2 a serem utilizados para a geração de perfis e comparações litológicas da Fm. San Miguel no departamento do Alto Paraná, Paraguai.

sedimentares continental, deltaico, costeiro e marinho raso (ORUÉ, 1996 apud THORNBURG; THOMAS; JOHANSEN, 1993). A Fm. San Miguel foi depositada sobre a Fm. Permiana-Carbonífera Coronel Oviedo e subjacente à Fm. Permiana Tacuary (equivalente estratigráfico à Fm. Irati) (PEREZ-LOINAZE et al., 2010), e está limitada por discordâncias regionais (KOVACS, 1990). A Fm. San Miguel considera-se o equivalente cronoestratigráfico da Fm. Rio Bonito na porção paraguaia da Bacia do Paraná, devido às posições estratigráficas idênticas das duas formações ricas em arenito. Além disso, ambas as formações estão depositadas sobre o intervalo glacial (o Grupo Itararé no setor brasileiro e a Fm. Coronel Oviedo na parte paraguaia da Bacia de Paraná), indicando um contexto deposicional similar para ambas as formações (PEREZ-LOINAZE et al., 2010). Por conseguinte, a extensão da Fm. Rio Bonito no Paraguai tem sido historicamente interpretada como a Fm. San Miguel. Destacam-se os basaltos da Fm. Serra Geral, de idade cretácea, que cobrem a Bacia do Paraná e geram dificuldades para a aquisição de dados sísmicos (KOVACS, 1990).

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Levantamento bibliográfico

A metodologia desta pesquisa de mestrado contemplou, inicialmente, uma revisão bibliográfica que permitiu uma compreensão geral do tema, no tocante ao (i) contexto das mudanças climáticas, (ii) tecnologias de CCS, (iii) técnicas analíticas laboratoriais usadas na pesquisa, (iv) dados geológicos e geofísicos da Bacia do Paraná, e (v) informações geológicas, petrofísicas, mineralógicas e geoquímicas das formações Rio Bonito e San Miguel.

Na etapa de revisão bibliográfica sobre as tecnologias de CCS buscou-se atender ao objetivo de responder às perguntas previamente elaboradas sobre (i) a existência de equivalentes sedimentares aos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel em projetos de armazenamento de CO₂ internacionais e (ii) quais experiências de projetos internacionais de armazenamento geológico de CO₂ podem ser usadas no contexto brasileiro. Em adição, essa revisão bibliográfica resultou na redação de um artigo científico intitulado *Integrated Assessment of Global Carbon Capture, Utilization, and Storage Projects*, publicado no periódico internacional *International Journal of Greenhouse Gas Control*, com versão final disponível para o público em 21 de dezembro de 2023 (VARGAS-GUZMÁN; SANT'ANNA, 2023). O manuscrito pode ser acessado no link <<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.104031>> e apresenta avaliações qualitativas e quantitativas dos projetos de CCUS/CCS em escala comercial considerando suas características técnicas e operacionais, e as propriedades geológicas de reservatórios e rochas selantes. Para a melhor interpretação dos dados levantados, foram desenvolvidas análises estatísticas através de gráficos *Letter-Value*, *cross-plots* e Análise de Componentes Principais (ACP).

As principais informações coletadas sobre esses reservatórios e selantes em projetos internacionais de CCS são apresentadas no Item 4. Resultados e servirão para comparação com os atributos geológicos e petrofísicos das formações Rio Bonito e San Miguel. Essa análise comparativa busca atender ao objetivo de responder às perguntas previamente mencionadas sobre (i) a existência de equivalentes sedimentares aos arenitos das formações Rio Bonito e San Miguel em projetos internacionais de armazenamento de CO₂ e (ii) quais

experiências de projetos internacionais de armazenamento geológico de CO₂ podem ser usadas no contexto brasileiro. As respostas a essas perguntas serão apresentadas nos itens ???. Análise e Interpretação dos Resultados, 5. Discussão dos Resultados e 6. Conclusões deste documento.

3.2 Levantamento de fontes estacionárias de CO₂

O levantamento de fontes estacionárias de CO₂ foi efetuado nos estados de São Paulo (SP) e Paraná (PR), maiores emissores brasileiros no setor de energia (Fig. 6), com a finalidade de se avaliar o possível interesse na implementação de um ou vários projetos de armazenamento do CO₂ gerado a partir das atividades emissoras de gases de efeito estufa. Devido ao interesse no setor de energia, foram levantados 34 parques de produção de biocombustíveis da empresa Raízen, os quais serviram de referência para essa pesquisa e são visualizados na Fig. 17. A escolha desse padrão de referência baseou-se, primeiramente, no fato de que a Raízen é uma das maiores produtoras de etanol do Brasil, com numerosos parques de produção distribuídos pelo estado de São Paulo. Em segundo lugar, os dados sobre a localização desses parques estão acessíveis na página oficial da empresa. É importante ressaltar que esse tipo de informação não é facilmente obtido quando proveniente de outras empresas associadas à produção de etanol.

3.3 Área de estudo das formações Rio Bonito e San Miguel

A área de estudo selecionada para a pesquisa das rochas arenosas da Fm. Rio Bonito corresponde aos estados de SP e PR, onde há importante emissão de CO₂ oriunda do setor de energia, e é possível estabelecer comparações laterais entre dados de testemunhos de perfuração com recuperação de testemunhos de rochas no Brasil e Paraguai.

3.4 Levantamento de dados de rochas arenosas das formações Rio Bonito e San Miguel em perfis estratigráficos

O levantamento de dados sedimentológicos (litologia e cor), mineralógicos e geofísicos de rochas arenosas, em especial arenitos, da Fm. Rio Bonito foi efetuado na base de dados de poços disponíveis na plataforma do programa REATE (Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis, 2020), vinculado ao Serviço Geológico do Brasil e disponível no seguinte link <<https://reate.cprm.gov.br/anp/>>, além de relatórios técnicos. Nesta plataforma, foram levantados 71 poços (ver pontos verdes na Fig. 17) nos estados de SP e PR, com possível interesse para o estudo da Fm. Rio Bonito. A partir desse conjunto inicial, a seleção de poços foi determinada (i) pela proximidade aos parques de

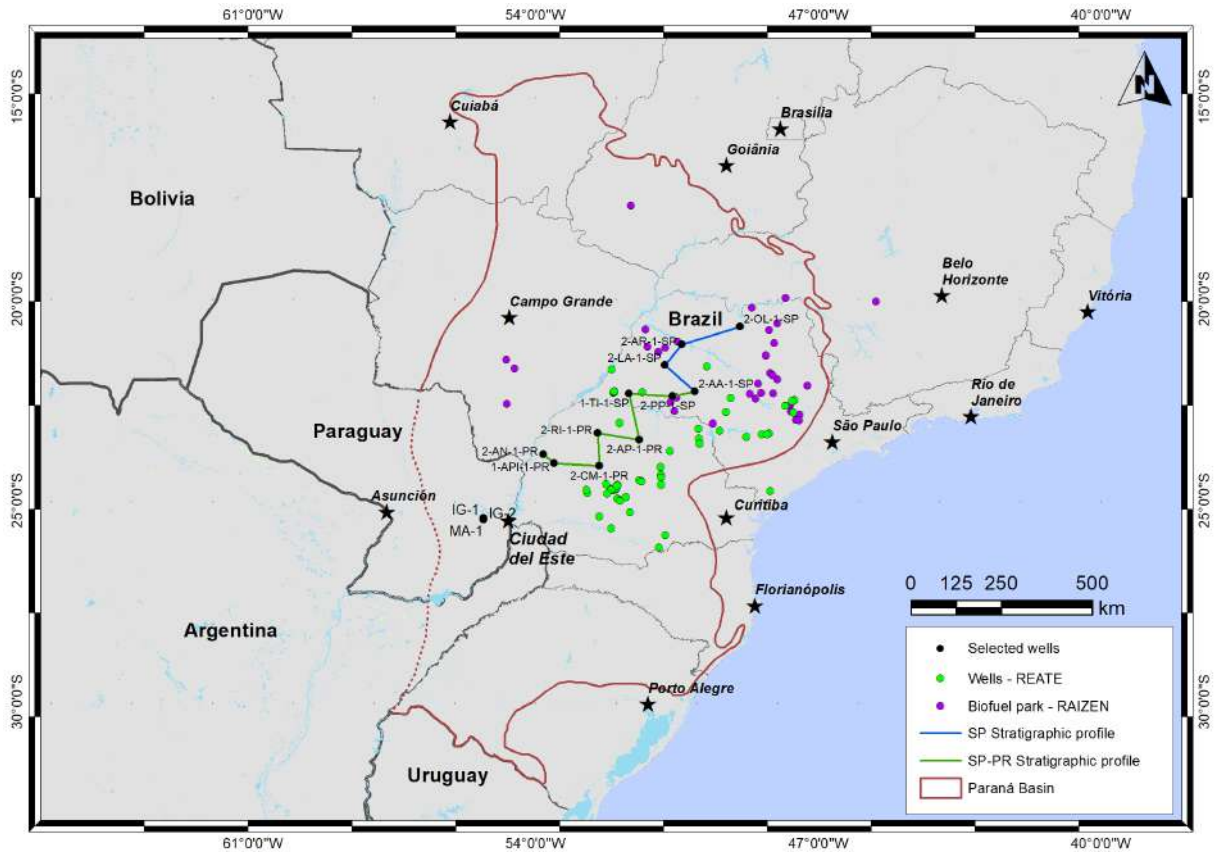


Figura 17 – Localização de poços selecionados nessa pesquisa, parques de bioenergia da empresa Raizen e limite da Bacia do Paraná. Fontes: Poços tomados de Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020) e parques de bioenergia tomados de Raizen (2020).

bioenergia da Raizen, visando a distância mínima de transporte para o armazenamento de CO_2 , e (ii) que estivessem distantes do limite de ocorrência da Fm. Rio Bonito na borda leste da Bacia do Paraná, reconhecido pela área de afloramentos ou ausência nos poços (espessura zero). Assim, foram selecionados 11 poços perfurados no território brasileiro que atingiram a Fm. Rio Bonito (Fig. 17).

Para a Fm. San Miguel foram usados os únicos três poços disponíveis, localizados no Departamento do Alto Paraná na região leste do Paraguai, identificados como: IG-1, IG-2 e ML-1.

Dessa forma, um total de 14 poços foram utilizados para a construção de perfis e comparações litológicas das formações Rio Bonito e San Miguel e assim, reconhecer a espessura vertical das litologias nas formações de interesse. Ambos os conjuntos de poços foram agrupados por regiões, como pode ser visualizado na Tabela 1. Um total de 14 perfis foram construídos com base na litologia, espessura e cores descritas para cada camada nos relatórios técnicos de descrição de cada poço. É preciso mencionar que no caso do poço ML-1, os dados dos relatórios técnicos foram complementados com os perfis de raios gama

e resistividade de PEREZ-LOINAZE et al. (2010).

Tabela 1 – Poços selecionados para as comparações litológicas das formações Rio Bonito e San Miguel.

Região	Poços
Estado de São Paulo, BR	2-OL-1-SP, 2-AR-1-SP, 2-LA-1-SP e 2-AA-1-SP
Estados de São Paulo e Paraná, BR	2-AN-1-PR, 1-API-1-PR, 2-CM-1-PR, 2-RI-1-PR, 2-AP-1-PR, 1-TI-1-SP, 2-PP-1-SP e 2-AA-1-SP
Departamento do Alto Paraná, PY	IG-1, IG-2, ML-1

3.5 Caracterização das propriedades do reservatório utilizando curvas de perfilagem geofísica de poços

Baseados nos 14 perfis estratigráficos gerados, foram selecionados 9 testemunhos no Brasil e 3 testemunhos no Paraguai, totalizando 12 testemunhos. Essa seleção é devida à presença de camadas de arenitos (i) a profundidades superiores a 800 m, profundidade mínima recomendada para a injeção de CO₂ no estado supercrítico, (ii) que exibem espessuras maiores ao valor mínimo requerido de 5 m e (iii) que não apresentaram composição litológica desfavorável para o armazenamento de CO₂ (TOMIĆ et al., 2018).

Para a Fm. Rio Bonito, as curvas de perfilagem geofísica analisadas podem ser visualizadas na plataforma REATE, disponíveis no seguinte link <<https://reate.cprm.gov.br/anp/>>. Para a Fm. San Miguel foram utilizadas as curvas do reporte de Kovacs (1990). É preciso mencionar que para o testemunho ML-1 só foi possível caracterizar certas camadas de interesse devido à disponibilidade de curvas de perfilagem unicamente entre 633,98 m (2080 ft) e 755,90 m (2480 ft).

Cada camada de arenito identificada foi nomeada utilizando o nome completo do poço correspondente e acrescentada uma letra em ordem alfabética. Posteriormente, foram utilizadas as curvas de Raio Gama (GR), perfil sônico (DT) e Porosidade neutrônica (NPHI).

O procedimento foi feito da seguinte forma:

- Raio Gama Induzido: utilizado para calcular o índice de argilosidade, também conhecido como Índice de Gamma Ray, e assim conhecer o conteúdo de argila na rocha do potencial reservatório aplicando:

$$I_{GR} = \frac{GR_{lido} - GR_{minimo}}{GR_{maximo} - GR_{minimo}} \quad (3.1)$$

E considerando os arenitos pré-terciários da bacia, segundo Larionov (1969), tem-se:

$$V_{sh} = 0,33(2^{2I_{GR}} - 1) \quad (3.2)$$

- Perfil sônico: utilizado para calcular a porosidade sônica da camada em % através de:

$$\phi_t = \frac{\Delta t_{lido} - \Delta t_{matriz}}{\Delta t_{fluido} - \Delta t_{matriz}} \quad (3.3)$$

Nessa pesquisa considerou-se o tempo de trânsito da matriz quartzosa igual a 55 $\mu\text{s}/\text{ft}$ e do fluido (água) igual a 189 $\mu\text{s}/\text{ft}$, valores tomados da caracterização de reservatório de BRUNORO, RODRIGUES e SILVA (2013).

- Porosidade neutrônica: dado que a medida é obtida diretamente do registro de poço, foi feita uma média de porosidade para cada camada de interesse em %.

Posteriormente, calculou-se a média entre a porosidade sônica e a neutrônica para cada camada de interesse usando a expressão:

$$\phi = \frac{\phi_t + \phi_n}{2} \quad (3.4)$$

3.6 Análises laboratoriais

3.6.1 Descrição macroscópica de amostras

A parte laboratorial da pesquisa compreendeu uma primeira etapa de análise de 88 amostras de rochas sedimentares arenosas do testemunho ML-1 localizado no Paraguai, coletadas em um trabalho de campo prévio pela orientadora. Esta análise concentrou-se na descrição macroscópica da litologia e cores das amostras (Fig. 18) utilizando a escala de tamanho de grão e as tabelas de cores de solo de Munsell Color Co., Inc. (2000), e elaboração de perfil litológico.

3.6.2 Multi-Sensor Core Logger

O sistema Multi-Sensor Core Logger, abreviado MSCL, (Fig. 19) coleta de maneira rápida e não destrutiva dados de imagem, geofísicos e geoquímicos de alta resolução de testemunhos de sedimentos e rochas, tipicamente com espaçamento mínimo de 1 mm no sentido longitudinal. A qualidade superior da estratigrafia multiparâmetro resultante do sistema MSCL possibilita seu uso em diferentes aplicações segundo as necessidades da pesquisa, como a classificação das fácies, a categorização de tipos de solo/sedimento/rocha antes de ou em conjunto com uma descrição visual (Geotek Ltd, 2018b).



Figura 18 – Exemplo de descrição macroscópica de amostra de testemunho.

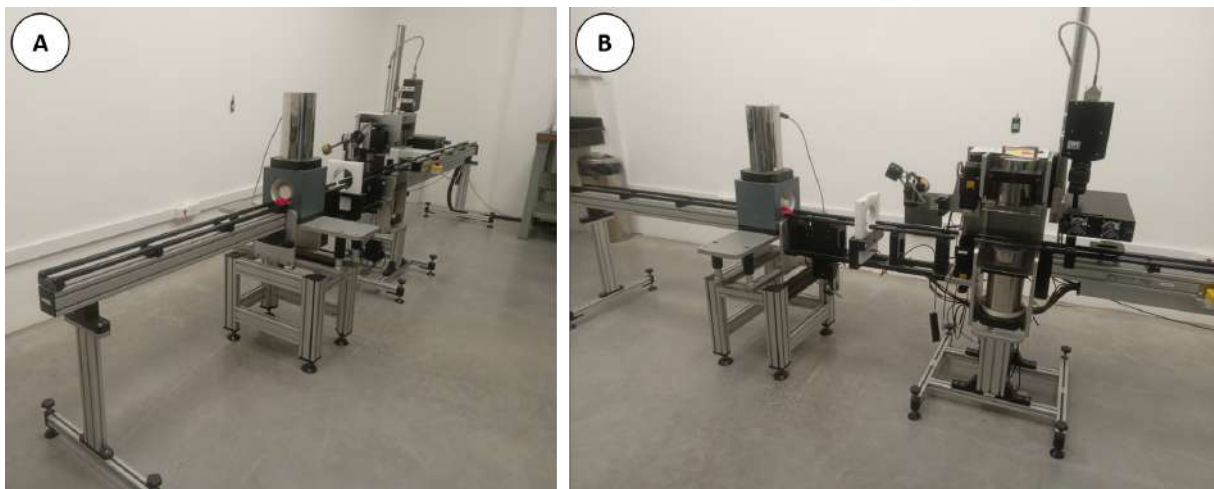


Figura 19 – Equipamento Multi-Sensor Core Logger da companhia Geotek Limited instalado no Instituto de Energia e Ambiente da USP.

O MSCL opera de forma automatizada, deslocando as amostras de testemunho diante de uma série de sensores. A vantagem do MSCL está na sua configuração modular, que possibilita a incorporação de diversas tecnologias de sensores de imagem, petrofísicos e geoquímicos em um único sistema de escaneamento de amostras, resultando em um conjunto de dados co-registrados e único ao longo do comprimento da amostragem. O equipamento tem a capacidade de acomodar tanto testemunhos de sedimentos não consolidados, inteiros ou divididos em revestimentos, quanto testemunhos de rochas inteiros ou fatiados, com ou sem revestimento. A configuração do MSCL pode ser adaptada conforme as necessidades

da pesquisa, permitindo medições co-registradas de profundidade para cada sensor em intervalos que variam de 1 mm a 150 mm ao longo do testemunho, com uma precisão de posicionamento superior a 0,1 mm (Geotek Ltd, 2020).

3.6.3 Susceptibilidade magnética

Todos os materiais apresentam propriedades magnéticas quando as suas temperaturas são superiores ao zero absoluto (0 K) (TARLING; HROUDA, 1993 apud SILVA, 2011). As características magnéticas são determinadas pelo alinhamento dos elétrons em seu interior, gerando diferentes tipos de materiais segundo esse alinhamento. Tais materiais são classificados através de um parâmetro físico conhecido como susceptibilidade magnética, a qual representa a capacidade de um material de magnetizar-se em resposta a um campo magnético aplicado (SILVA, 2011). A susceptibilidade magnética está representada pela seguinte relação:

$$M = k \cdot H \quad (3.5)$$

Sendo M a magnetização gerada em Ampere por metro (A/m), k a susceptibilidade magnética adimensional e H o campo magnético aplicado também em Ampere por metro (A/m) (SILVA, 2011).

Em relação à classificação dos materiais magnéticos, esta pode ser descrita da seguinte forma: quando a susceptibilidade magnética é positiva, o material pode ser classificado como paramagnético, ferromagnético ou antiferromagnético. Nestes casos, a presença do material reforça o campo magnético. Por outro lado, se a susceptibilidade magnética é negativa, o material é diamagnético e, conseqüentemente, a presença dele enfraquece o campo magnético (Geotek Ltd, 2018a).

Entre as aplicações, as alterações na susceptibilidade magnética dentro das amostras de testemunho frequentemente estão relacionadas à estratigrafia. Assim, os registros de susceptibilidade magnética podem ser usados como uma ferramenta de comparação de testemunho a testemunho. Além disso, a ferramenta pode ser utilizada para prever as propriedades litológicas, bem como quaisquer mudanças na proveniência do sedimento e/ou no ambiente diagenético (Geotek Ltd, 2018a). No entanto, não é possível determinar a constituição mineral da rocha dado que todos os minerais são avaliados coletivamente e os resultados obtidos ao final do processo de medição são globais (SILVA, 2011).

O princípio operacional do sensor de susceptibilidade magnética no MSCL se descreve da seguinte forma: um circuito oscilador no sensor gera um campo magnético alternado de baixa intensidade, que não atinge a saturação e tem aproximadamente 80 ampères por metro (A/m) de valor eficaz (RMS). Qualquer material próximo ao sensor que tenha susceptibilidade magnética causará uma mudança na frequência do oscilador. A

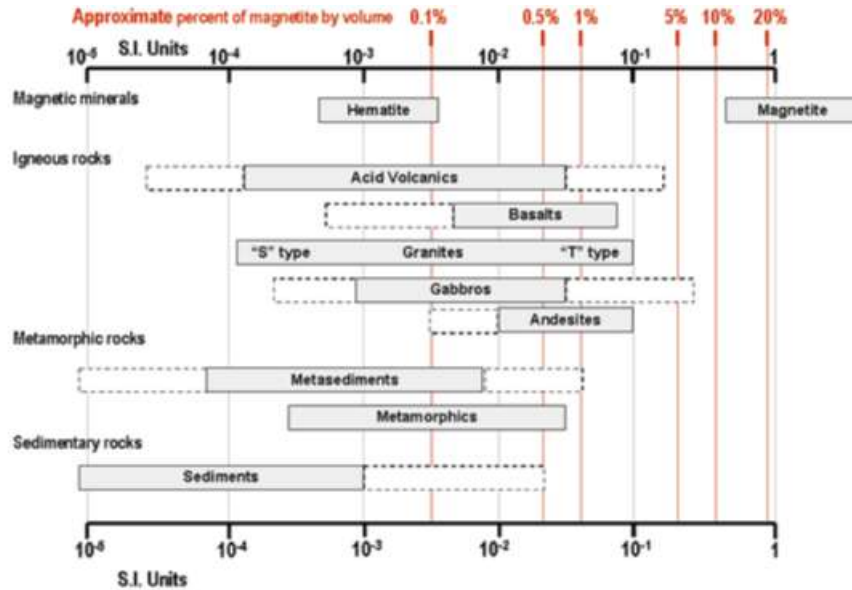


Figura 20 – Valores de susceptibilidade magnética das rochas. Fonte: (DEVELOPERS, apud CLARK; EMERSON, 1991).

eletrônica do sistema MSCL converte essas informações de frequência pulsada em valores de susceptibilidade magnética, que são expressos em unidades do Sistema Internacional (SI) ou no sistema CGS (Geotek Ltd, 2018a).

3.6.4 Espectrometria Gama Natural

Existem três elementos radioativos considerados importantes devido a sua grande contribuição radioativa em inúmeras quantidades de rochas e, especialmente, na crosta terrestre. Em particular, o ^{238}U e seus produtos de decaimento radioativo, o ^{232}Th e seus produtos de decaimento e o ^{40}K produzem radioatividade detectável ao estarem presentes na maioria dos minerais que formam rochas (KILLEEN; MWENIFUMBO; FORD, 2015).

O potássio é predominantemente encontrado no mineral feldspato, o qual é abundante e amplamente distribuído na crosta terrestre, em concentração relativamente elevada (medida em porcentagem em peso do óxido K_2O). Também está presente em outros minerais comuns que constituem as rochas, como a mica (dos tipos biotita e muscovita). Por outro lado, embora o urânio e o tório geralmente ocorram em concentrações relativamente baixas, medidas em partes por milhão (ppm), eles podem ser encontrados em uma ampla diversidade de minerais (KILLEEN; MWENIFUMBO; FORD, 2015).

As medições da radiação gama natural, seja em contagens por segundo (cps) brutos ou unidades API, são comumente utilizadas na comparação entre testemunho e poço, devido à sua padronização como medida de referência. Além disso, essas medições também desempenham um papel importante na comparação entre testemunhos, funcionando como uma medida suplementar à susceptibilidade magnética. Como a radioatividade natural

tende a se concentrar em argilas e folhelhos, em contraste com areias, ela pode servir como um indicador para avaliar a presença desses materiais sedimentares. Caso dados espectrais detalhados sejam obtidos, é possível estimar as concentrações reais de potássio (K), urânio (U) e tório (Th); essas informações podem ser utilizadas para uma comparação mais precisa entre testemunho e poço, ou podem ser combinadas com outros indicadores mineralógicos, como análises elementares de fluorescência de raios X (XRF) ou espectros de infravermelho, para mapear as características litológicas (Geotek Ltd, 2018c).

Em termos operacionais, a configuração completa do sensor de Espectrometria Gama Natural consiste geralmente em três detectores de NaI(Tl) de 3"x 3", alojados em blindagens de chumbo com 6" de diâmetro, embora possa incluir pelo menos um deles. Cada unidade de detecção é composta por um cristal de NaI(Tl) que está conectado de forma óptica a um tubo fotomultiplicador e ligado a uma base de polarização integrada, juntamente com um Analisador de Múltiplos Canais (MCA). Quando os raios gama são emitidos, atingem os cristais de NaI(Tl), gerando um pulso de luz. Esses fótons, por sua vez, atingem o tubo fotomultiplicador, gerando uma pequena corrente elétrica que resulta em um pulso de voltagem. A altura desse pico de voltagem corresponde à energia da emissão gama, a qual é registrada pelo analisador de múltiplos canais em um dos 1024 canais disponíveis (Geotek Ltd, 2018c).

3.6.5 Fluorescência de Raios-X

A técnica analítica conhecida como Fluorescência de Raios X (XRF, em inglês) é amplamente aceita para determinar a composição de rochas e sedimentos. A base do método XRF envolve a excitação de elétrons por meio de radiação X incidente. Quando elétrons são liberados das camadas atômicas internas, isso cria espaços vazios que, por sua vez, são preenchidos por elétrons que retornam das camadas externas, resultando na emissão de radiação X secundária como um pulso de energia adicional. A energia de fluorescência liberada e os espectros de comprimento de onda resultantes são características únicas de átomos de elementos específicos, o que possibilita a estimativa de suas proporções relativas (WELTJE; TJALLINGII, 2008).

Uma das principais vantagens da técnica de XRF acoplada ao MSCL em comparação com a análise geoquímica tradicional de amostras individuais é que as intensidades dos elementos podem ser obtidas diretamente na superfície de um testemunho de sedimento ou rocha. Adicionalmente, os dispositivos de varredura de XRF oferecem uma resolução espacial consideravelmente superior quando comparados com os métodos convencionais destrutivos. Isso possibilita a obtenção de registros praticamente contínuos das intensidades dos elementos a partir dos testemunhos de sedimento ou rocha (WELTJE; TJALLINGII, 2008).

No entanto, a conversão das intensidades dos elementos, que são medidas pelos sensores de XRF, em concentrações de elementos, um requisito fundamental para aplicações quantitativas da composição química do material, é frequentemente considerada um aspecto desafiador. Por esse motivo, os resultados obtidos por meio da varredura de XRF geralmente são apresentados sob a forma de taxas de contagem (expressas como contagens por unidade de tempo por unidade de área) ou como razões de contagens, taxas de contagem ou intensidades dos elementos. Portanto, os dados provenientes dos sensores de XRF são amplamente reconhecidos unicamente como semi-quantitativos (WELTJE; TJALLINGII, 2008).

3.6.6 Caracterização de amostras utilizando Multi-Sensor Core Logger

Utilizando o perfil litológico do testemunho ML-1, foram selecionadas 15 amostras (Tabelas 2 e 3), considerando as camadas de arenitos com características apropriadas para o armazenamento de CO₂. Especial atenção foi colocada nas amostras do grupo 1 já que fazem parte de uma única camada consideravelmente espessa. Caso contrário foram as amostras do grupo 2 que representam camadas de diversas espessuras e profundidades. Nesse contexto, as profundidades das amostras foram verificadas e os seus comprimentos foram medidos usando uma trena metálica.

Tabela 2 – Grupo 1 de amostras selecionadas para serem analisadas com os equipamentos MSCL e DRX

Grupo 1 de amostras selecionadas		
Nº	Comprimento (cm)	Profundidade (m)
74	19.2	1151.2
73	24.7	1152.1
71	18.6	1163.5
72	13.3	1164.5
69	29.0	1189.9
70	15.9	1190.6

As amostras foram lavadas e secas por 5 minutos para eliminar qualquer pó ou resíduos superficiais. Posteriormente, foram organizadas segundo a profundidade do testemunho ML-1, seguindo da superfície até a base (Fig 21).

Tabela 3 – Grupo 2 de amostras selecionadas para serem analisadas com os equipamentos MSCL e DRX

Grupo 2 de amostras selecionadas		
N°	Comprimento (cm)	Profundidade (m)
11	16.0	713.0
14	24.1	718.4
20	18.0	736.8
21	6.4	738.1
24	22.2	747.6
29	12.3	759.7
30A	7.5	760.3
30B	18.6	761.4
87	16.1	835.0



Figura 21 – Grupos de amostras selecionadas do testemunho Mallorquín N° 1 que atingiram a Fm. San Miguel. (A) Grupo 1 de amostras características de topo a base: 11, 14, 20, 21, 24, 29, 30A, 30B e 87. (B) Grupo 2 de amostras características de topo a base: 74, 73, 71, 72, 69 e 70.

Em seguida, foi utilizado o sensor GeoScan do Multi-Sensor Core Logger (MSCL), equipamento já instalado e operante nas instalações da Divisão de Petróleo, Gás Natural e Bioenergia do IEE/USP (Fig. 19), para a captura de imagens RGB.

Para a determinação das propriedades petrofísicas das amostras, foram utilizados três sensores: Susceptibilidade Magnética, Gama Natural Espectral e Fluorescência de Raios X já instalados no MSCL. Os dados foram obtidos cada 2 mm mantendo uma temperatura ambiente entre 18,44 °C e 19,07 °C.

3.6.7 Princípios da Difração de Raios X

A difração de raio-X baseia-se nos seguintes princípios: o campo elétrico que oscila em uma onda de luz interage com os elétrons presentes na matéria, resultando em um espalhamento de luz coerente. Esses pontos de espalhamento são fontes adicionais de ondas esféricas. Conseqüentemente, as ondas que se espalham a partir de dois objetos se expandem no espaço circundante até que ocorra uma interferência entre elas. Essa interação gera interferência construtiva em ângulos de visão específicos e interferência destrutiva em outros ângulos, dependendo da distância entre os dispersores e das características das ondas de radiação. Quando um arranjo periódico de objetos espalha a radiação de forma coerente, a interferência construtiva ocorre em ângulos específicos, e esse fenômeno é conhecido como difração. No caso de estruturas cristalinas, os dispersores consistem em átomos organizados com distâncias da ordem de angstroms, e os efeitos de interferência são observados quando a frente de onda incidente possui um comprimento de onda na região dos raios X do espectro (JENKINS; SNYDER, 1996).

Um cristal apresenta múltiplas relações periódicas tridimensionais entre seus átomos constituintes, o que permite que difracte uma onda monocromática em diversas direções distintas no espaço tridimensional. Os ângulos de difração estão diretamente relacionados com as diferentes relações periódicas entre os átomos que compõem o cristal. Para compreender esse fenômeno, usa-se o modelo dos três planos cristalográficos de Bragg (Fig. 22). Nesse modelo, os raios X incidentes são imaginados como provenientes da esquerda e refletindo em cada um dos planos pertencentes a uma família de planos cristalinos. Assumindo que as ondas iniciais estão em fase umas com as outras e que todas as ondas refletem a partir dos planos da família, podemos derivar rapidamente a equação que controla o fenômeno. De acordo com a lei de Snell na reflexão, os ângulos de incidência e de reflexão devem ser iguais. Observa-se que a onda refletida pelo segundo plano precisa percorrer uma distância ABC maior do que a onda que reflete pelo plano superior. Analogamente, a onda que reflete pelo terceiro plano deve percorrer uma distância DEF maior. Como resultado, todas as ondas refletidas por planos abaixo da superfície estarão defasadas em relação à primeira onda, ocasionando interferência. A geometria dos planos revela que quando a distância ABC é precisamente igual a um comprimento de onda (λ), a distância DEF será igual a 2λ , fazendo com que a reflexão de todos os planos, em qualquer profundidade no cristal, ocorra em fase, resultando na interferência construtiva característica da difração (JENKINS; SNYDER, 1996).

A obtenção da equação de Bragg começa com uma análise do triângulo retângulo OAB. A distância AB pode ser calculada usando o seno de θ :

$$AB = d_{hkl} \sin \theta \quad (3.6)$$

Onde, d é a distância interplanar para o conjunto de planos (hkl) e θ é o ângulo de

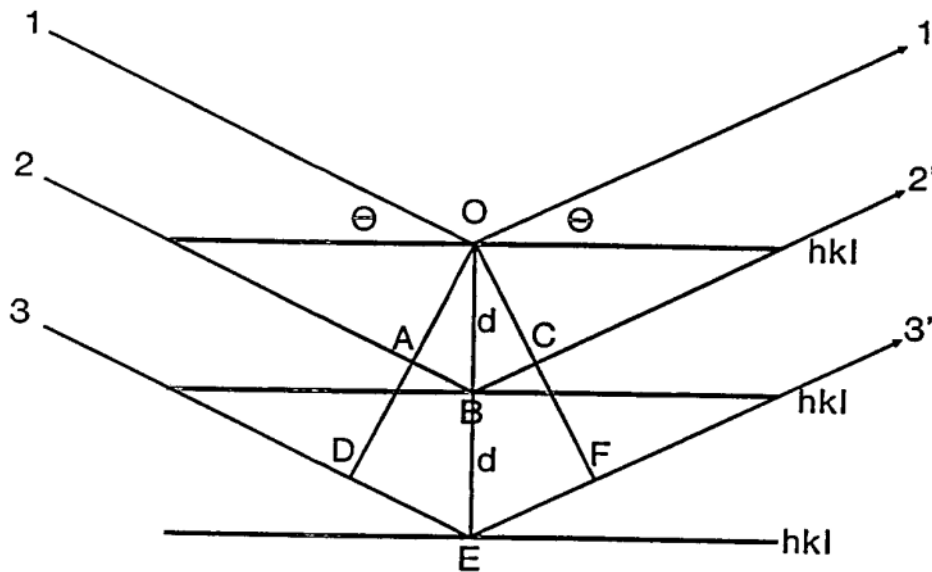


Figura 22 – Modelo de três planos cristalográficos (hkl) usado para visualizar o comportamento dos raios X sendo refletidos de acordo com a lei de Bragg. Fonte: Jenkins e Snyder (1996).

incidência, medido entre o feixe incidente e os planos atômicos.

Se ambos os planos refletirem os raios X em fase, a diferença de caminho percorrido pelo feixe de raios X deve ser um número inteiro de comprimentos de onda. Assim, a condição para que ocorra a difração se dá pela lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.7)$$

Onde, λ é o comprimento de onda da radiação X (monocromática) e n é um número inteiro correspondente à ordem de difração dos planos do cristal em questão (GOMES et al., 1984).

Para as ondas que penetram mais profundamente no cristal, estas também experimentarão um atraso de fase que é um múltiplo integral do comprimento de onda, garantindo que todas as ondas emergentes no ângulo de Bragg estejam em fase. Nesse desenvolvimento da equação de Bragg, é suposto que os raios X incidentes estejam em fase e que eles reflitam em planos imaginários (JENKINS; SNYDER, 1996).

Na difração de raios X, as variáveis λ , n e θ são conhecidas, uma vez que a radiação utilizada deve ser monocromática, o ângulo θ pode ser medido no padrão de difração (difratograma) e o número n é específico para cada plano cristalográfico do cristal. Portanto, a única variável não determinada é d . As distâncias entre planos cristalinos de uma substância são características intrínsecas dela, assim como o índice de refração, a densidade, o ângulo óptico e outras constantes. Portanto, um conjunto de valores de d em um difratograma pode ser usado para identificar a substância (SILVA, 2013).

Os instrumentos convencionais usados para realizar medições de difração de raios X incluem difratômetros que realizam análises por meio do método do pó e difratômetros com câmaras de monocristais acopladas. Estes últimos são empregados em situações específicas, como quando a disponibilidade de amostras é limitada, ou principalmente em estudos que visam a determinação de parâmetros cristalográficos (SILVA, 2013). É por isso que na maioria dos centros de pesquisa, universidades e indústrias são utilizados os difratômetros de raios-x com o método do pó. Eles oferecem diversas vantagens como a rapidez na obtenção dos resultados e uma maior facilidade na preparação das amostras (GOMES et al., 1984), (SILVA, 2013 apud ANTONIASSI, 2010).

Os difratômetros de raios X foram inicialmente projetados com uma configuração de geometria parafocal Bragg-Brentano. Nessa disposição básica, o equipamento é composto por um tubo de raios X, um goniômetro que pode ser posicionado horizontalmente (θ - 2θ) ou verticalmente (θ - 2θ ou θ - θ) e um detector de raios X (SILVA, 2013).

No caso da geometria θ - 2θ (Fig. 23), o tubo de raios X (L) permanece fixo, enquanto o goniômetro se move ao longo do círculo H a uma velocidade angular de 2θ por passo, ao longo do eixo C. Esse movimento também desloca a amostra (P) com metade da velocidade angular, isto é, θ por passo. O raio do círculo do goniômetro permanece constante, mantendo igual distância entre o tubo de raios X e a amostra, assim como entre a amostra e o detector (T). Entretanto, o raio do círculo focal varia com o ângulo, garantindo que a superfície da amostra esteja sempre tangente ao círculo focal (SILVA, 2013 apud ANTONIASSI, 2010).

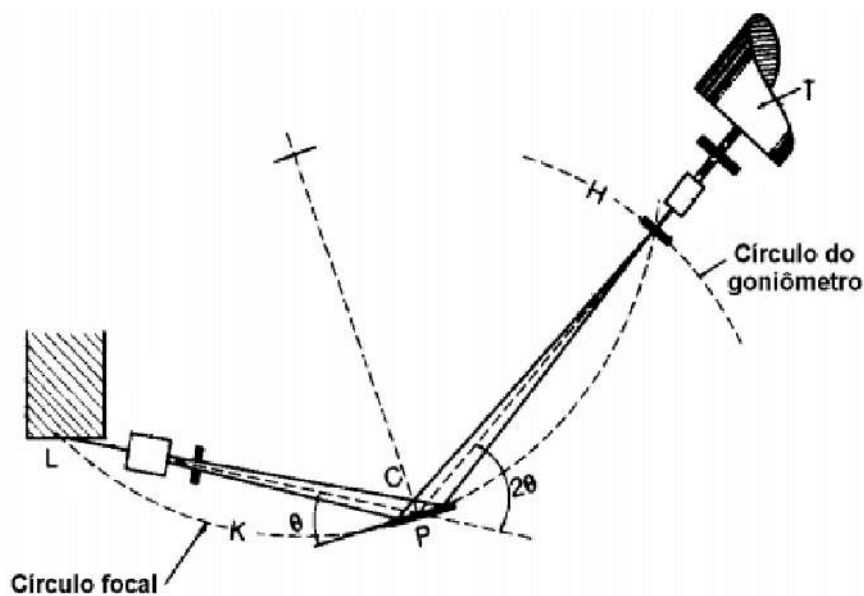


Figura 23 – A geometria Bragg-Brentano é empregada na configuração θ - 2θ de um difratômetro de raios X. Fonte: Jenkins e Snyder (1996).

Na configuração θ - θ de difratômetros (Fig. 24) tanto o tubo de raios X quanto o

detector movem-se verticalmente de forma simultânea com uma velocidade angular de $(2\theta/\text{passo})$ ao longo do eixo do suporte, que permanece fixo em relação à amostra. Uma das hastes do goniômetro acomoda toda a óptica primária, incluindo o tubo de raios X, as fendas e os sistemas de filtros da óptica primária. A outra haste do goniômetro abriga a óptica secundária, composta pelas fendas e sistemas de filtros da óptica secundária, pelo monocromador e pelo detector (SILVA, 2013 apud ANTONIASSI, 2010).

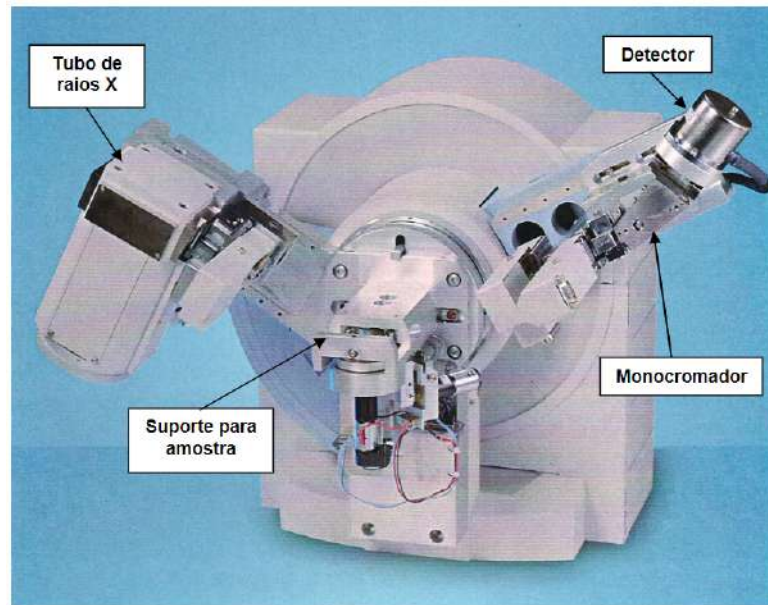


Figura 24 – Difratômetro de raios X com configuração θ - θ , no qual o tubo de raios X e o detector estão acoplados. Fonte: Silva (2013).

Em ambas as configurações, o resultado obtido é o padrão de difração ou difratograma (Fig. 25). No detector, o feixe difratado detectado é geralmente representado por picos que se destacam do fundo (linha de base) e são registrados em um gráfico que mostra a intensidade em função do ângulo 2θ . Cada pico no difratograma corresponde à reflexão, conforme a lei de Bragg, dos raios X nos planos da rede cristalina das fases presentes na amostra, cada uma delas com índices de Miller (reflexões hkl). Cada pico possui uma altura (intensidade), área e posição angular específicas. Esses parâmetros físicos de um conjunto de picos refletem as características da estrutura cristalina das fases presentes no material e estão diretamente relacionados às proporções relativas dessas fases quando se trata das intensidades relativas entre conjuntos de picos de diferentes fases (SILVA, 2013 apud ANTONIASSI, 2010).

3.6.8 Caracterização de amostras através de Difração de raios X

Para a utilização da técnica de Difração de raios X (DRX), primeiramente, foram adquiridos fragmentos de cada amostra selecionada, variando de 1,5 g a 3 g (Fig. 26a).

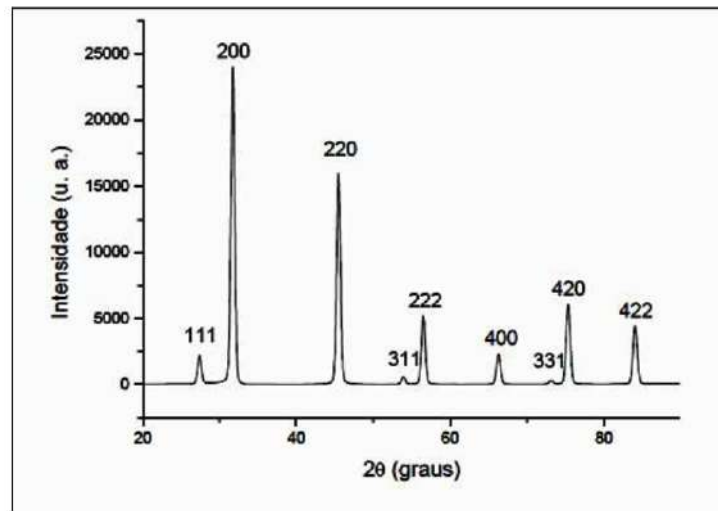


Figura 25 – Difratograma do cristal de NaCl com identificação de seus índices de Miller correspondentes. Fonte: Silva (2013).

Esses fragmentos foram moídos utilizando um pistilo e um almofariz de ágata e o pó foi colocado em um porta-amostra de acrílico (Figs. 26b, c), posteriormente, foi analisado no difratômetro (Fig. 26d). Foi utilizado o Difratômetro Bruker D8 Advance Eco, equipado com detector LYNXEYE XE e sistema theta-theta, adquirido pelo IEE USP no âmbito da Rede GASBRAS (Convênio FINEP 01.14.0215.00). Os difratogramas foram obtidos com radiação CuK alpha, 40kV, 25mA, air-scatter automático e utilizando fendas primária de 0,5 mm e secundária de 1,0 mm, colimador de 2,5° e filtro de Ni. A análise ocorreu entre 2° e 100° 2θ , com passo de 0,02° 2θ e tempo de aquisição de 3,1 segundos.

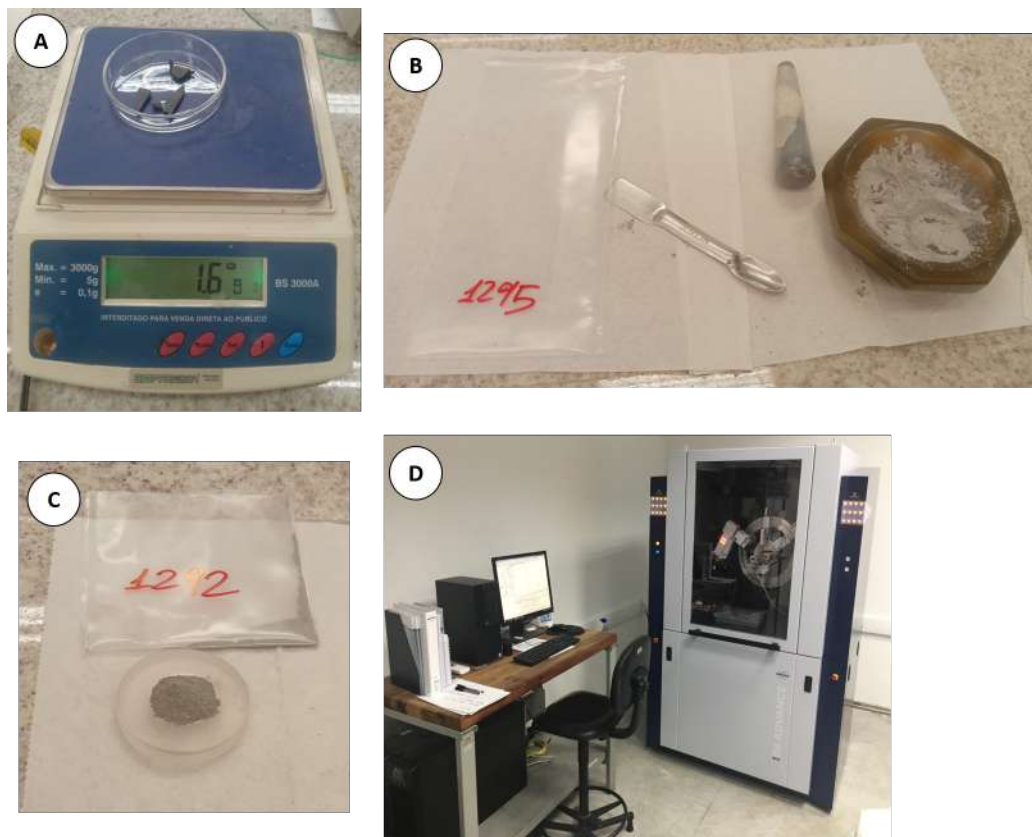


Figura 26 – (a) Etapa de medição da massa dos fragmentos das amostras. (b) Fragmentação de amostra por meio de moagem utilizando um pistilo e um almofariz de ágata. (c) Amostra moída colocada em um porta-amostra acrílico. (d) Difratorômetro Bruker D8 Advance Eco nas instalações do IEE USP.

RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Projetos internacionais de CCS/CCUS

No artigo publicado em conjunto com a orientadora, *Integrated Assessment of Global Carbon Capture, Utilization, and Storage Projects* (2023) foi desenvolvida uma avaliação integrada das propriedades técnicas e geológicas dos atuais projetos globais de CCS/CCUS para estabelecer diretrizes possíveis para locais de armazenamento de carbono adequados, com foco na geologia regional e na natureza dos reservatórios e camadas impermeáveis. Isso foi realizado por meio de estudos qualitativos, quantitativos e estatísticos, destacando a utilidade das técnicas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais, para reconhecer padrões potenciais de reservatórios e camadas impermeáveis para o armazenamento geológico de CO₂, e possivelmente para estudos futuros.

Em termos de diretrizes técnicas, agrupam-se as conclusões da seguinte forma:

- A indústria de gás natural tem sido a principal fonte antrópica de CO₂, seguida pela produção de fertilizantes.
- Existem 13 instalações com capacidade de captura superior a 1 MtpaCO₂. Além disso, 39 projetos com capacidade de captura de pelo menos 1 MtpaCO₂ foram anunciados para serem construídos até o final da década de 2030.
- A distância entre a fonte e o reservatório varia de 1 a 600 km, com o sistema de dutos sendo a infraestrutura de transporte preferida.
- Embora 22 das instalações estejam localizadas em terra, todos os projetos estão situados a diferentes distâncias dos limites das placas tectônicas e, portanto, em contextos tectônicos diferentes, com diferentes esforços tectônicos e gradientes geotérmicos atuando sobre eles, gerando implicações para uma melhor comparação entre projetos, seus esquemas de construção e monitoramento ambiental.

- 22 projetos utilizaram CO₂ para operações de Enhanced Oil Recovery (EOR). No entanto, 79 novos projetos relacionados ao armazenamento geológico dedicado estão em diferentes estágios de desenvolvimento até o final da década.

No tocante às propriedades geológicas, as descobertas foram as seguintes:

- As bacias tipo *foreland* periférica representam 22 % dos sub-regimes de bacia associados, e o mesmo percentual de projetos está associado a sub-regimes de baixa atividade sísmica.
- As rochas clásticas são a litologia de reservatório mais comum. No entanto, os carbonatos também representam um local de armazenamento relevante. Além disso, as rochas vulcânicas mostraram grande potencial para o armazenamento geológico de carbono.
- 51 % dos reservatórios foram depositados em ambientes de transição.
- A idade do reservatório é amplamente diferente, mas é predominantemente Carbonífera e Cretácea. Essa faixa etária também é consistente com as idades dos reservatórios de petróleo mais prolíficos.
- A maioria dos reservatórios existentes estão na faixa de 1.200 m a 2.300 m.
- Em 50 % dos reservatórios, o armazenamento geológico tem se revelado eficaz em estratos que variam de camadas finas, com pelo menos 10 m de espessura, até formações mais espessas de até 185 m.
- Reservatórios com porosidades entre 12,9 % e 21 % e permeabilidades entre 14,2 e 500 mD seriam adequados para armazenamento geológico.
- Apenas 37 % das rochas selantes são compostas por folhelhos. Na verdade, seis das dez combinações de litologia selante examinadas incluíam folhelhos.
- A significativa variação na espessura das rochas selantes sugere que a captura de CO₂ tem sido bem-sucedida tanto em estratos finos quanto em camadas extremamente espessas. Contudo, é crucial destacar que a relevância desse parâmetro pode ser atenuada, dependendo da permeabilidade das rochas selantes.

Em relação à Análise de Componentes Principais, as conclusões gerais foram agrupadas da seguinte forma:

- A eficácia da análise multivariada na redução das dimensões (parâmetros) de um pequeno conjunto de dados foi demonstrada.

- Foi possível reconhecer quais são os parâmetros geológicos e petrofísicos de ambas as rochas reservatório e selante de maior relevância em projetos de CCUS/CCS.
- A classificação de projetos de CCUS/CCS em grupos com características semelhantes foi alcançada usando classificadores apropriados.

No tocante às observações específicas resultantes da ACP, estas foram resumidas da seguinte maneira:

- Reservatórios e rochas selantes seguem um comportamento esperado em termos de correlações porosidade-idade geológica, porosidade-permeabilidade e compactação. Apesar do conjunto de dados limitado, relações interessantes surgiram: reservatórios e rochas selantes foram depositados em idades geológicas semelhantes; reservatórios localizados em ambientes continentais parecem estar situados em níveis mais profundos; a porosidade e permeabilidade devem ser mais baixas em rochas mais antigas; há um maior grau de correlação entre reservatórios antigos e ambientes deposicionais marinhos; formações depositadas em ambientes marinhos tendem a ser mais finas; a porosidade primária é esperada ser maior em rochas siliciclásticas depositadas em ambientes continentais.
- A idade da rocha selante, a idade do reservatório e a porosidade do reservatório contribuíram significativamente para o primeiro componente principal (*PC1*). Da mesma forma, o segundo componente (*PC2*) está intimamente relacionado à profundidade do reservatório e à espessura da capa. A litologia do reservatório e a porosidade da rocha selante revelaram correlações moderadas com o terceiro (*PC3*) e o quarto (*PC4*) componentes, respectivamente.
- Ao utilizar a classificação da salinidade da água da formação, o estudo do *PC3* sugere que reservatórios compostos por litologia siliciclástica foram depositados em ambientes de transição. Pelo contrário, reservatórios carbonáticos estavam mais relacionados a ambientes marinhos.
- Ao empregar a classificação do sub-regime da bacia, três dos seis grupos identificados se destacam. Os dois primeiros grupos relacionados às bacias tipo sag post-rift e *foreland* periféricas têm litologia de reservatório e ambiente deposicional semelhantes. No entanto, projetos localizados em bacias sag post-rift têm reservatórios mais recentes com maior porosidade do que aqueles que têm reservatórios localizados em bacias *foreland* periféricas, que são mais antigas. Além disso, os reservatórios depositados em bacias sag post-rift estão localizados em uma faixa de profundidade mais rasa do que as bacias *foreland* periféricas, que variam marcadamente em profundidade. O terceiro grupo, relacionado às bacias tipo sag intracratônicas, tende

a ser depositado em idades geológicas mais antigas, com profundidades e litologias de reservatório semelhantes.

4.2 Dados geológicos e comparações de testemunhos

No mapa da Fig. 27 são apresentadas as isópacas da Fm. Rio Bonito (ZALÁN, 1990), os poços selecionados da plataforma REATE e as plantas de produção de etanol da empresa Raizen. Observa-se que os poços estão localizados entre 12 e 713 km das plantas. Em relação às isópacas, que representam a espessura total da formação, dos seis poços selecionados na parte central do Estado de SP, três estão situados entre as curvas de 0 e 50 m (2-AR-1-SP, 2-LA-1-SP e 2-PP-1-SP) e os outros três (2-OL-1-SP, 2-AA-1-SP e 1-TI-1-SP) entre as isópacas 50 e 100 m. Na região centro-oeste do Estado do PR, o poço 2-AP-1-PR está entre as curvas 50 e 100 m e os demais entre as isópacas 100 e 150 m.

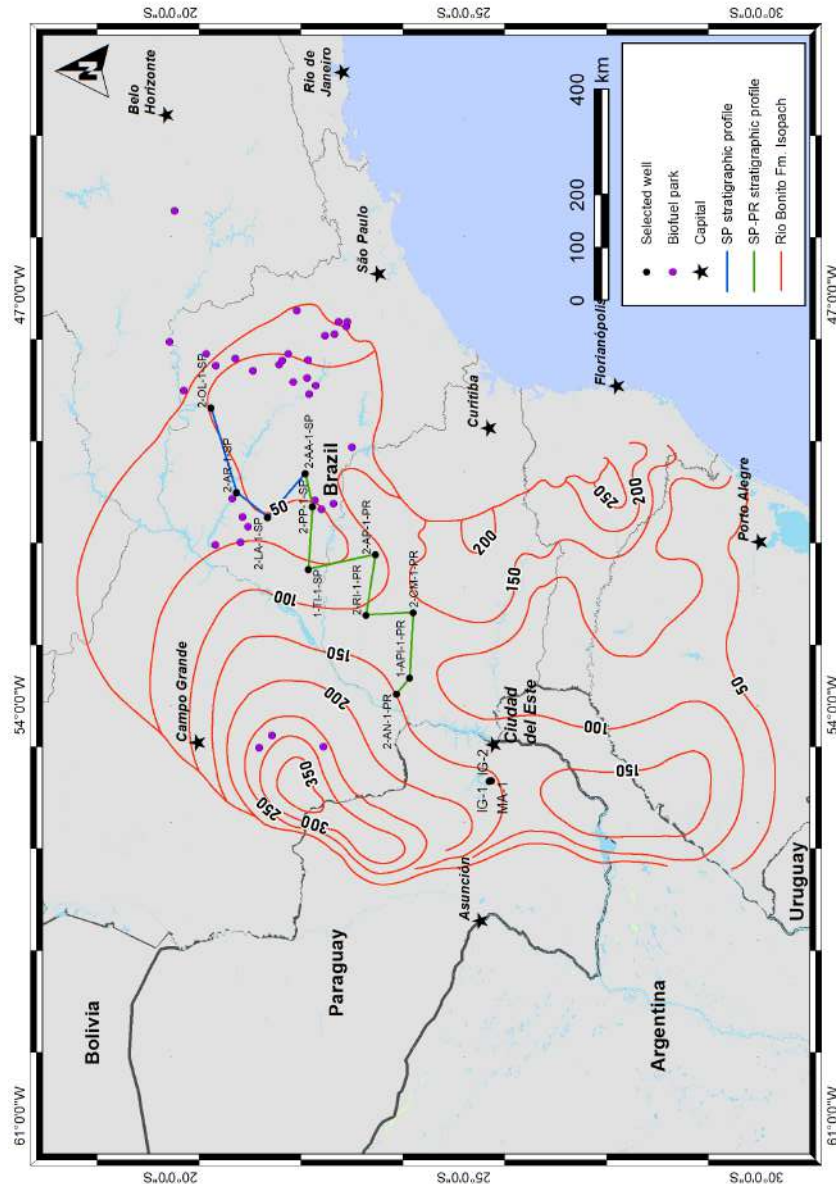


Figura 27 – Localização de poços selecionados nessa pesquisa, parques de bioenergia da empresa Raizen e isópacas da Fm. Rio Bonito. Fontes: Poços tomados de Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020). Parques de bioenergia tomados de Raizen (2020). Isópacas tomadas de Zalán (1990).

Em relação ao estudo da estratigrafia das formações Rio Bonito e San Miguel, foram gerados 14 perfis estratigráficos utilizando os dados litológicos de poços que atingiram a Fm. Rio Bonito obtidos na plataforma REATE e os relatórios técnicos da Fm. San Miguel.

A comparação entre os testemunhos da Fm. Rio Bonito mostra uma variação relativa da profundidade da formação de NE para SW no Estado de São Paulo (SP) (Fig. 28). Isto pode ser confirmado no testemunho 2-OL-1-SP, localizado ao norte do estado de SP, onde o topo da formação está a 1469 m de profundidade. Por outro lado, nos testemunhos 2-AR-1-SP e 2-LA-1-SP, localizados mais a sudoeste, a formação está a maior profundidade, 1907 m e 2303 m, respectivamente. No entanto, observa-se que no

testemunho 2-AA-1-SP a formação está mais rasa que nos testemunhos anteriores, porém mantendo a tendência de aumento da sua profundidade de NE para SW. Assim, de forma geral, mostra-se que a Fm. Rio Bonito aumenta sua profundidade no sentido NE-SW, sendo coerente com o modelo de Bocardi et al. (2009), visualizado na Fig. 14.

Em relação à espessura da formação, primeiro esta diminui no sentido SW, de 76 m no testemunho 2-OL-1-SP até 45 m no testemunho 2-LA-1-SP. Posteriormente, a espessura aumenta no sentido SE, como observado no testemunho 2-AA-1-SP, chegando até 76 m. De forma geral, existe um aumento relativo da profundidade da Fm. Rio Bonito no sentido SW, o que é coerente com o modelo de Zalán (1990), visualizado na Fig. 27. É preciso mencionar que o testemunho 2-OL-1-SP, com espessura igual a 144 m, está localizado entre as isópacas de 50 m a 100 m, o que poderia indicar que no modelo de Zalán (1990) foram desconsiderados o diabásio e a camada de arenito branco na base da formação, já que ao serem desconsiderados a espessura estimada no testemunho é igual a 51 m.

No tocante à litologia, esta é variada, sendo composta principalmente por arenito, siltito e folhelho, e subordinadamente por alguns níveis de calcário e diabásio. Todas as litologias apresentam cores diferentes: cinza, marrom, vermelho, verde e branco. Isto sugere diversas composições mineralógicas. Nota-se a presença de arenitos de cores cinza escuro a cinza claro, que poderiam conter composições restritas a silicatos. Também encontram-se arenitos de cor marrom claro que poderiam conter a presença de óxido de ferro localizados nos poros das rochas. Adicionalmente, arenitos e siltitos esverdeados poderiam exibir a presença de argilominerais.

Em outro aspecto, arenitos e siltitos são as litologias predominantes, apresentando as maiores espessuras em todos os testemunhos, sendo comum observar intercalações de ambas as litologias. A espessura dos arenitos varia entre 2 m a 21 m e a dos siltitos varia entre 1 m a 9 m. Destacam-se alguns calcários encontrados no testemunho 2-LA-1-SP com média de espessura de 2 m e no testemunho 2-AR-1-SP variando entre 1 a 2 m. Também é notável a presença de um diabásio de 93 m no testemunho 2-OL-1-SP.

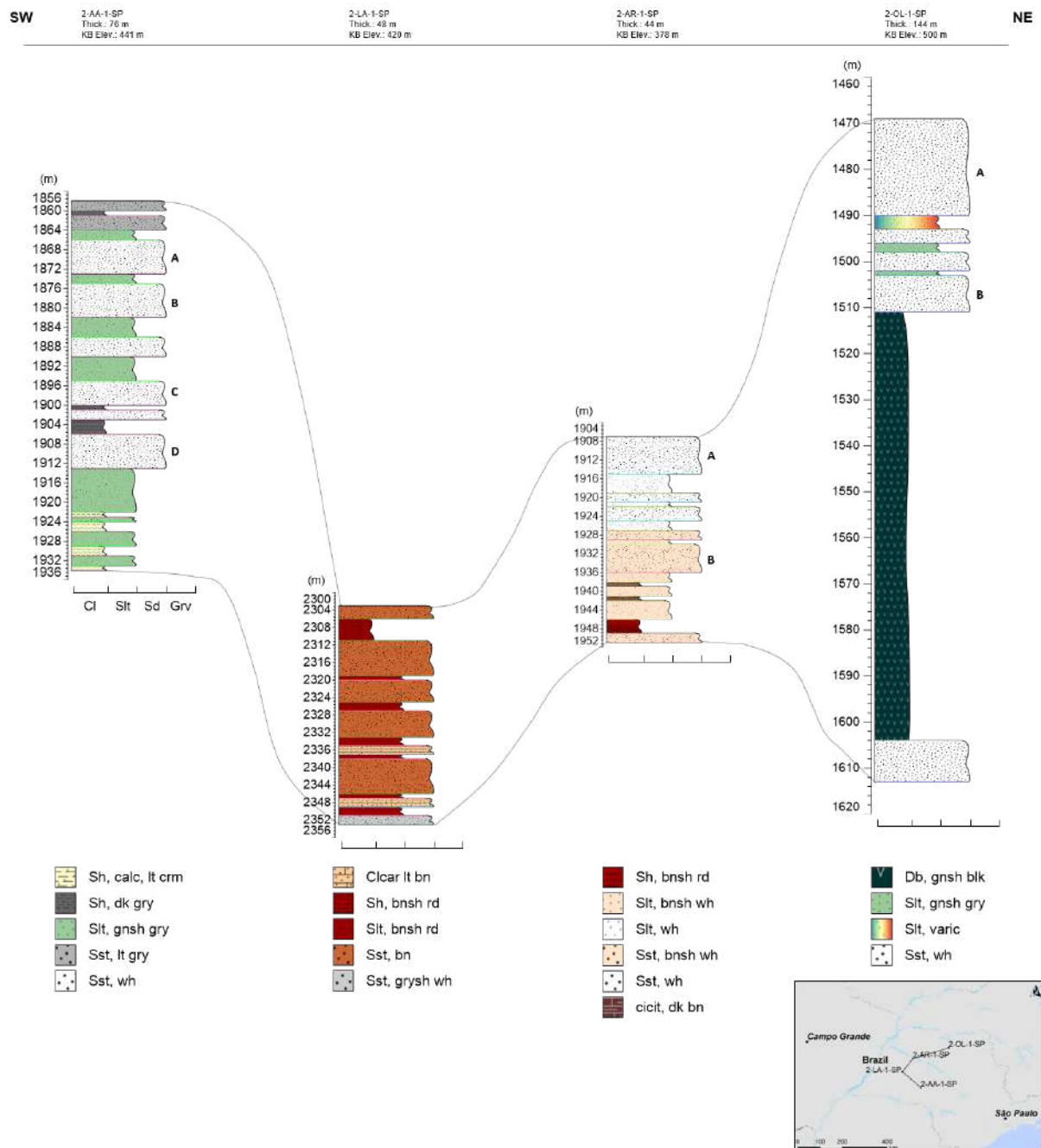


Figura 28 – Comparação litológica da Fm. Rio Bonito para a região de SP com orientação NE-SW e escala vertical relativa. A comparação foi obtida por meio dos perfis estratigráficos de 2-AA-1-SP a 2-OL-1-SP. Granulação indicada na base dos perfis: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. Nos perfis é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte: Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020)

Na comparação de testemunhos para a região centro-sul de SP até a região oeste do PR (Figs. 29 e 30) foi observada um aumento relativo da profundidade da formação de NE para SW, sendo mais rasa na região centro-sul do Estado de SP, com topo a 1858 m no testemunho 2-AA-1-SP, e mais profunda no extremo oeste do Estado do PR, com topo a 3927 m no testemunho 2-AN-1-PR. Isto exhibe um comportamento similar com o modelo de Bocardi et al. (2009) (Fig. 14).

Em relação à espessura da Fm. Rio Bonito, esta varia lateralmente aumentando relativamente no sentido SW, mostrando valores de 49 m no testemunho 2-PP-1-SP até 277 m no testemunho 2-CM-1-PR. Ao serem comparados com o estudo de Zalán (1990) (Fig. 27) seis dos oito testemunhos utilizados para a comparação SP-PR mostram espessuras similares às daquelas do modelo proposto por esse autor. Os testemunhos 1-TI-1-SP e 2-CM-1-PR mostram espessuras maiores às das isópacas de Zalán (1990).

De forma similar à comparação dos testemunhos da região de SP, a litologia da formação é variada, sendo composta principalmente de arenito, siltito e folhelho, e subordinadamente por calcário e diabásio. Adicionalmente, todas as litologias apresentam diversas cores: cinza, marrom, vermelho e branco, sugerindo composições mineralógicas diferentes.

A espessura de todas as litologias encontradas é bem variável, sendo o arenito e o siltito as litologias com maiores espessuras em todos os testemunhos. No empilhamento vertical, são encontrados arenitos intercalados com siltitos em todos os testemunhos. As camadas de arenito podem ser bem delgadas até espessuras apreciáveis, chegando ao máximo de 26 m no testemunho 2-AN-1-PR, no extremo oeste do PR. De igual forma, os siltitos podem ter pouca espessura e até o máximo de 46 m no testemunho 1-API-1-PR. Destacam-se as camadas de diabásio no testemunho 2-CM-1-PR com espessura de 78 m e de folhelho com 46 m espessura no testemunho 1-TI-1-SP. Ao longo dessa seção de direção geral NE-SW, é possível observar que nos testemunhos da região de SP (2-AA-1-SP, 2-PP-1-SP e 1-TI-1-SP), as camadas de arenito estão presentes principalmente na parte superior à intermediária da Fm. Rio Bonito, enquanto os folhelhos localizam-se na parte inferior da formação. Na região noroeste do PR, os testemunhos apresentam intercalações de arenito, siltito e folhelho em quase toda sua extensão vertical, havendo dominância de arenito apenas no testemunho 2-AN-1-PR.

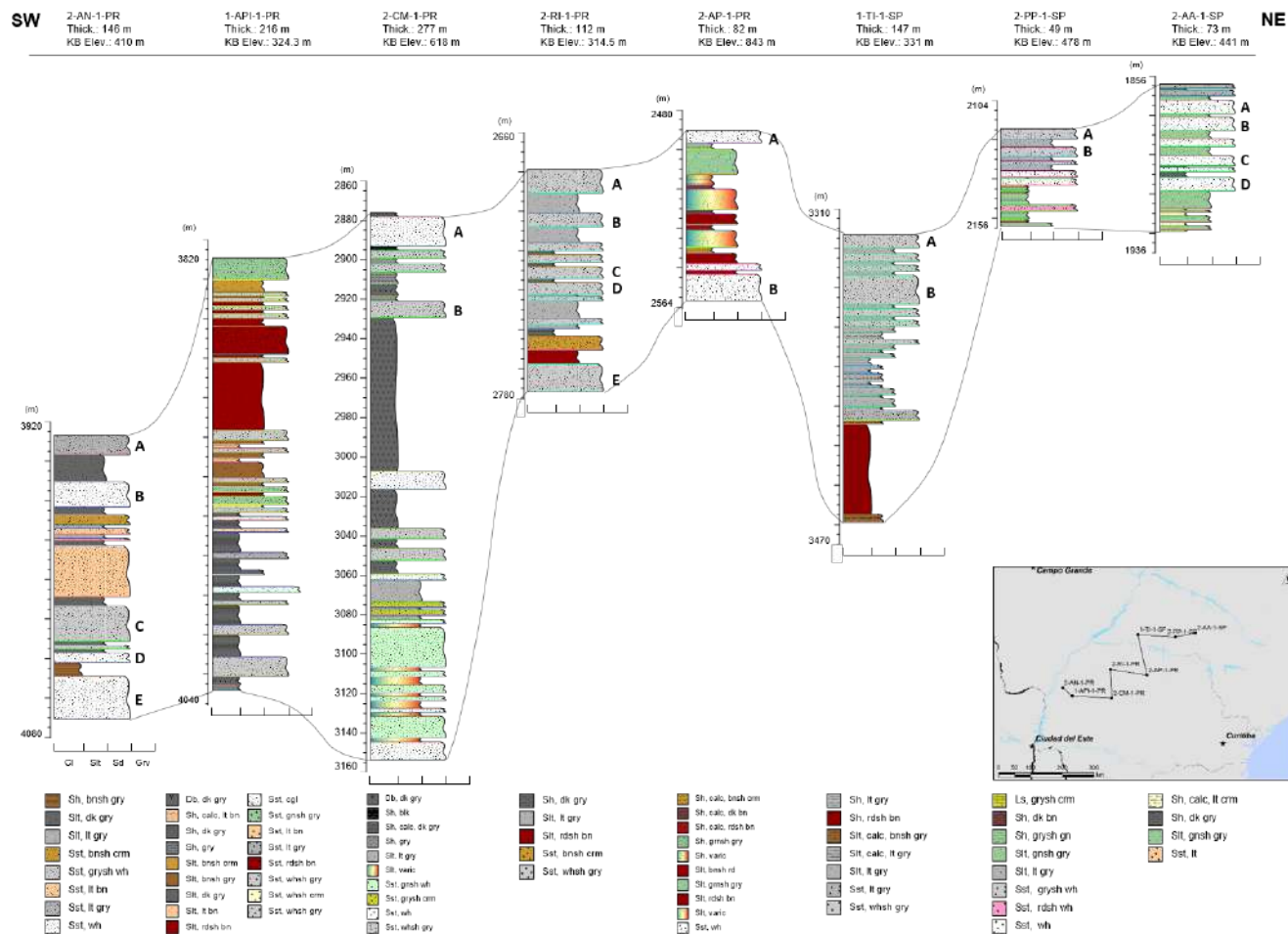


Figura 29 – Comparação litológica da Fm. Rio Bonito para a região de SP com orientação NE-SW e escala vertical relativa para visualização das diferenças de espessura da formação. A comparação foi obtida para os perfis litológicos elaborados para os testemunhos 2-AA-1-SP a 2-OL-1-SP. Granulação indicada na base dos perfis: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. Nos perfis é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte dos testemunhos de sondagem: Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis (2020)

No Paraguai, a Fm, San Miguel demonstra variação em sua profundidade (Fig. 31), apresentando camadas mais superficiais no testemunho ML-1, a uma profundidade de 515 m, na região sul, e camadas mais profundas no testemunho IG-1, a 646 m, na região norte. Tais valores são consideravelmente inferiores aos observados no modelo de Bocardi et al. (2009), visualizado na Fig. 14. Isto indicaria que a Fm. San Miguel está mais rasa no lado paraguaio da Bacia do Paraná, como efeito da deposição da Fm. San Miguel após o levantamento do Arco de Assunção entre o Siluriano e o Eodevoniano no oeste da Bacia do Paraná (FULFARO et al., 1982; MILANI, 2004). Além disso, já que a Fm. San Miguel está mais rasa, a injeção de CO₂ poderia diminuir consideravelmente as despesas operacionais e de infraestrutura em relação aos testemunhos estudados no lado do Brasil.

De norte a sul, observa-se um aumento da espessura de 128,52 m no testemunho IG-1 para 662,51 m no testemunho ML-1, se considerar a presença do diabásio espesso de 75,4 m (Fig. 31). Ao serem comparados os testemunhos do Paraguai com os estudados no Brasil, de forma geral, a Fm. San Miguel exhibe maiores espessuras que a Fm. Rio Bonito (Fig. 30). Isto é coerente com o modelo de Zalán (1990), que coloca o depocentro principal, região da bacia de maior espessura sedimentar, próximo ao Arco de Assunção na região oeste da Bacia do Paraná (Fig. 15).

Em relação à litologia, esta é variável e composta principalmente de arenitos e siltitos de diferentes tonalidades de cores cinza, marrom e verde, com algumas contribuições de calcários e presença de diabásios. Como foi mencionado anteriormente, tais cores das camadas estariam associadas a diversas composições mineralógicas. De forma específica, os arenitos variam desde espessuras menores do que 1 m até 103,63 m. De igual forma, os siltitos podem variar de espessuras menores do que 1 m até consideráveis 118,9 m. Também há presença de calcários, com espessuras entre 1,22 e 30,05 m, e sills de diabásio que podem chegar até 75,41 m de espessura, como observado no testemunho ML-1.

Em relação à distribuição das litologias nos testemunhos do Paraguai, na parte superior tanto de IG-1 como de IG-2, observam-se intercalações de arenitos e siltitos, principalmente de cor cinza e branco. No entanto, no testemunho IG-2 há maior presença de camadas espessas de arenito branco e cinza. Na parte intermediária do testemunho IG-1, nota-se o predomínio de camadas espessas de siltito de diferentes tonalidades cinzas. Por último, na parte inferior do testemunho IG-1 encontram-se diabásios que variam entre 4,19 m a 16,76 m de espessura. Destaca-se uma camada de arenito branco combinado com siltito negro com espessura aproximada de 4,19 m na parte basal do testemunho. Continuando com o testemunho IG-2, apesar do predomínio de siltitos cinzas na parte intermediária, também destaca-se uma maior proporção de camadas de arenito de diferentes cores, como observado nas profundidades 728 m e 749 m. Na base do testemunho IG-2 foram encontradas camadas espessas de arenito branco e cinza. Também há presença de siltito cinza e marrom. Mais ao sul, na parte superior do testemunho ML-1 estão

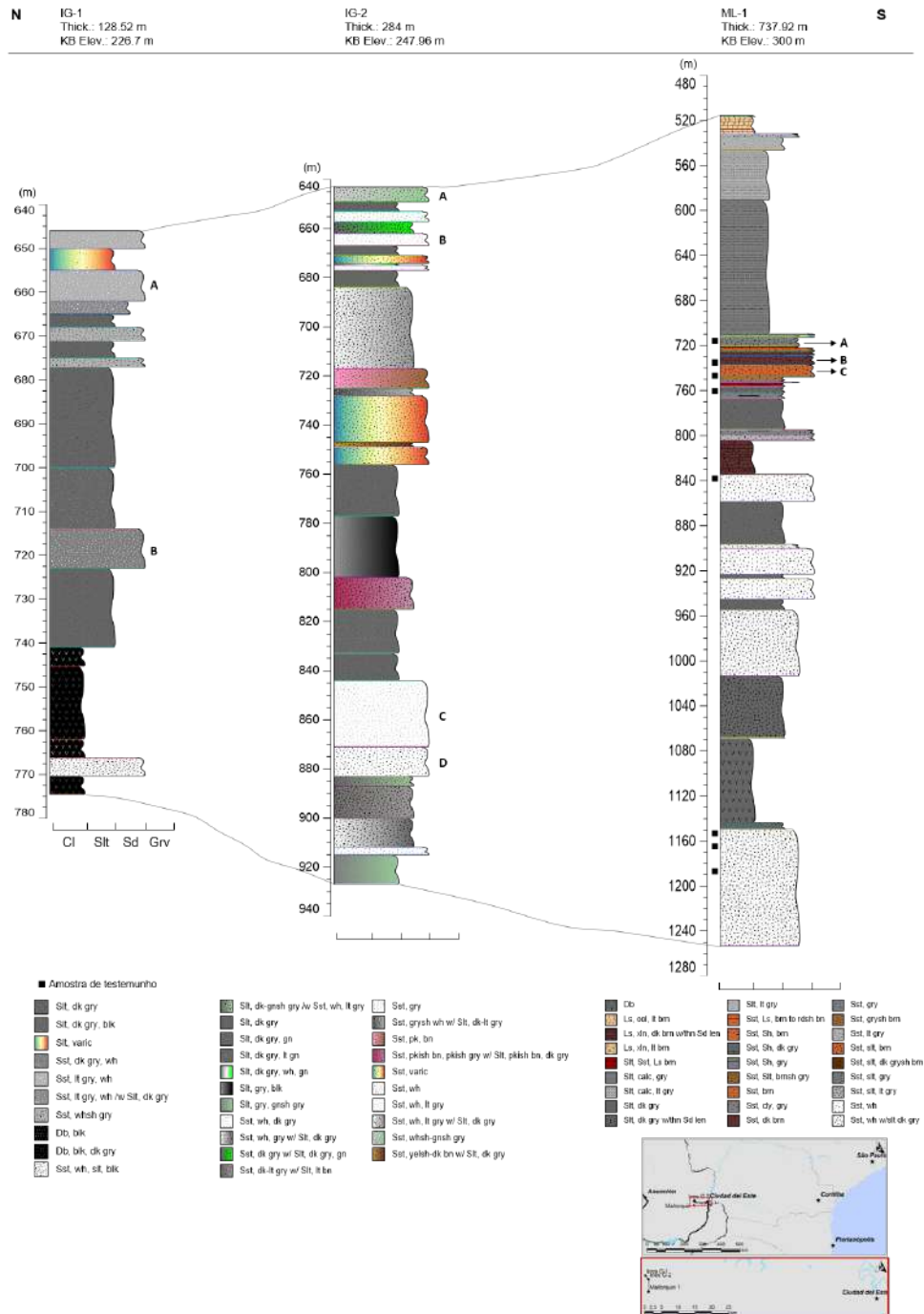


Figura 31 – Comparação litológica da Fm. San Miguel com escala vertical aumentada elaborado para os testemunhos Inés-1, Inés-2 e Mallorquín N° 1, situados no Paraguai. Granulação indicada na base do perfil: Cl – argila, Silt – silte, Sd – areia, Grv – cascalho. No perfil é mostrada a litologia e cor de cada camada. Fonte: Kovacs (1990).

soterradas camadas de calcário de cor marrom, siltito de cor cinza e cinza escuro e arenito de diferentes cores. Na parte intermediária observam-se camadas de arenito de cor branca e cinza escuro de espessuras entre 3,20 a 58,09 m. Na parte inferior, destaca-se um sill de diabásio de 75,4 m e uma camada de arenito branco com siltito cinza escuro de 103,3 m de espessura.

4.3 Resultados da análise macroscópica de amostras selecionadas do testemunho ML-1

Em ordem crescente de profundidade, os resultados da análise macroscópica das amostras selecionadas do testemunho ML-1 são apresentados nas tabelas e nas figuras do Apêndice A.

A descrição do primeiro grupo de amostras analisado é apresentada a seguir:

A amostra ML-74 é a amostra localizada a menor profundidade, em 1151,2 m, e corresponde a areia fina menor, tonalidade Gley 1, cor cinza escuro, com manchas de hidrocarboneto, e algumas laminações de areia fina maior a menor, tonalidade Gley 1, cor cinza esverdeada clara.

A amostra ML-73 localizada a maior profundidade, 1152,1 m, exhibe laminações intercaladas de areia media menor a fina maior, tonalidade amarela, cor cinza claro com areia fina menor a muito fina maior, cor preta.

A amostra ML-71 foi caracterizada como laminações horizontais e diagonais de areia fina maior a menor, tonalidade amarela, cor cinza com areia fina menor, tonalidade amarela, cor cinza muito escura.

A amostra ML-72 foi descrita em duas partes. O topo compreende intercalações de areia fina maior a menor, tonalidade amarela, cor cinza e preta. A parte intermediária à base compreende areia média menor a fina maior, tonalidade amarela, cor cinza.

A amostra ML-69 foi identificada em duas partes. O topo contém intercalações de areia fina menor a muito fina maior, tonalidade Gley 1, cor cinza muito escura, com areia fina menor a muito fina maior, tonalidade Gley 1, cor cinza esverdeada. A parte intermediária à base apresenta areia fina menor a muito fina maior, tonalidade Gley 1, cor cinza muito escura.

A amostra ML-70 foi descrita em três partes. O topo exhibe areia muito fina maior, tonalidade Gley 1, cor preta. A parte intermediária compreende areia fina maior a menor, tonalidade Gley 1, cor cinza escura. Finalmente, a base contém areia muito fina maior, tonalidade Gley 1, cor preta.

No segundo grupo de amostras selecionadas foram obtidos os seguintes resultados:

A amostra ML-11 estando localizada mais próxima à superfície no segundo grupo de amostras a 713 m de profundidade, exibiu areia media maior a menor, tonalidade amarela, cor cinza clara com laminações de areia fina maior, tonalidade amarela-vermelha, cor marrom acinzentada escura.

A amostra ML-14 localizada a 718,4 m de profundidade, apresenta areia grossa menor a fina maior, tonalidade amarela, cor marrom acinzentada escura a marrom acinzentada

com algumas laminações de silte e argila, tonalidade amarela, cor preta.

A amostra ML-20 foi caracterizada como areia media menor a maior, tonalidade amarela, cor marrom acinzentada escura a cinza muito escura.

A amostra ML-21 foi descrita como areia media menor a maior, tonalidade amarela, cor marrom muito escura.

A amostra ML-24 contém laminações de areia fina menor a muito fina maior, tonalidade amarela, cor marrom acinzentada escura e cor branca. Também, se identificaram impregnações de óleo ao longo da amostra.

A amostra ML-29 exhibe areia media menor, tonalidade amarela-vermelha, cor marrom com laminações de areia fina maior, tonalidade amarela, cor branca com silte, tonalidade amarela, cor cinza muito escura. Adicionalmente, foram encontradas impregnações de óleo em toda a amostra.

A amostra ML-30A apresenta laminações de areia media menor a fina maior, tonalidade amarela-vermelha, cor cinza clara a cinza, com algo de areia fina maior, tonalidade amarela, cor preta. Também, foram encontradas algumas impregnações de óleo em parte da amostra.

A amostra ML-30B contém areia fina menor a maior, tonalidade amarela, cor preta.

A última amostra do grupo 2 foi a ML-87, a qual foi caracterizada como areia fina menor a muito fina maior, tonalidade amarela, cor cinza clara a preta.

4.4 Implicações para a estocagem de CO₂ nas formações Rio Bonito e San Miguel

No tocante à estocagem de CO₂, as camadas de arenito da Fm. Rio Bonito apresentam maiores espessuras na parte intermediária a superior dos testemunhos na região central de SP, como se observa nas comparações SP (Fig. 28) e SP-PR (Fig. 29), com exceção do testemunho 2-LA-1-SP onde a distribuição dos arenitos varia verticalmente. Nesse contexto, os melhores locais de armazenamento de CO₂ encontram-se na parte intermediária a superior da Fm. Rio Bonito na região de SP. No Estado do PR, as camadas de arenito atingem até máximos de 26 m no testemunho 2-AN-1-PR, tendo uma distribuição mais variada verticalmente na maioria dos outros testemunhos. Assim, no caso do PR, os melhores locais para a estocagem estariam localizados a diferentes profundidades ao longo da Fm. Rio Bonito.

Na maioria dos testemunhos da região de SP (Figs. 28 e 29), os topos das camadas de arenito podem ser encontrados desde 1469 m a 2107 m de profundidade, o que indicaria injeções de CO₂ mais rasas que na região do PR, onde os topos localizam-se desde 2482

m a 3927 m de profundidade. Além disso, ao considerar os projetos internacionais de CCS/CCUS, as camadas da região de SP estão dentro da faixa de profundidade de reservatórios de projetos internacionais, isto é, entre 1.200 m e 2.300 m. No entanto, também há registro de reservatórios encontrados em profundidades superiores, como no projeto de CCUS localizado na Bacia de Santos (BR), cujo reservatório pode ser encontrado desde os 5.500 m de profundidade (VARGAS-GUZMÁN; SANT'ANNA, 2023).

Outro fator a ser considerado é a distância até o parque de biocombustível mais próximo. Tanto na região de SP como na região do PR, os testemunhos já disponíveis pela ANP e com camadas potenciais encontram-se a distâncias consideravelmente superiores a 10 km de um parque adjacente, o que implicaria em custos significativamente maiores de infraestrutura e transporte de CO₂. Cabe mencionar que os testemunhos 2-PP-1-SP e 2-AR-1-SP são os mais próximos dos parques, localizados a aproximadamente 12 km.

De forma mais específica, observa-se que em cinco de seis testemunhos analisados na região de SP existem camadas potenciais para o armazenamento de CO₂. Isso indicaria a presença de camadas de arenito mais espessas do que o valor de espessura mínimo requerido para a estocagem de CO₂, igual a 5 m (TOMICÍ et al., 2018).

No testemunho 2-OL-1-SP (Olimpia, SP) foram identificadas duas camadas com espessura apropriada para o armazenamento, sendo as camadas A e B de arenito branco com espessuras de 21 m e 8 m, respectivamente (Tabela 4). Em princípio, do ponto de vista mineralógico as camadas de arenito branco não representam algum problema para a estocagem de CO₂. Por outro lado, apesar da espessa camada A localizar-se a uma profundidade de 1469 m, sendo a mais próxima da superfície entre todas as camadas estudadas no lado brasileiro, e apresentar uma pequena proporção de argila, menor que 12 %, a sua porosidade é inferior a 6 % o que é considerado uma porosidade baixa e limitaria a capacidade de armazenamento. Por sua parte, a camada B deveria ser descartada devido à elevada proporção de argila, maior que 40 %, o que implicaria num espaço poroso bastante limitado para o armazenamento. É importante mencionar a presença de uma camada de arenito branco com espessura de 9 m, a qual em termos de profundidade, espessura e mineralogia poderia ser uma ótima candidata para a estocagem de CO₂. No entanto, sobreposto a essa camada encontra-se um considerável diabásio de 93 m de espessura, o que poderia ser um grande obstáculo para a injeção de CO₂ na camada inferior. Por outro lado, seriam necessárias técnicas de injeção adequadas que considerem as características do diabásio e, desta forma, este poderia funcionar como um selante apropriado para evitar o vazamento de CO₂. Nesse contexto, o testemunho 2-OL-1-SP poderia ser descartado para o armazenamento.

No caso do testemunho 2-AR-1-SP (Araçatuba, SP) também foram encontradas duas camadas potenciais (Tabela 5). A camada A composta de arenito branco, litologia que não deveria ser um obstáculo para a estocagem de CO₂, soterrada a 1907 m, com

Tabela 4 – Parâmetros do testemunho 2-OL-1-SP

Test.	2-OL-1-SP		D.P.	59,65			Topo	1469	Base	1613		
			(km)				(m)		(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GR _{max}	GR _{min}	GR _{lido}	IGR	V _{sh}	DT _{lido}	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	1469	1490	21	85	20	34	0,2154	11,482	63	5,97	Sem	5,97
											curva	
B	1503	1511	8			60	0,6154	44,448	60	3,73	Sem	3,73
											curva	

Legenda: D.P. - distância ao parque de biocombustível da Raizen mais próximo, Cam. - camada, Esp. - espessura, GR_{max} - máxima leitura da curva de Gamma Ray, GR_{min} - mínima leitura da curva de Gamma Ray, IGR - índice de argilosidade, V_{sh} - porcentagem de argila, DT_{lido} - tempo de trânsito da camada, porT - porosidade sônica, porN - porosidade neutrônica, por - média de porosidade.

espessura igual a 8 m e contendo proporção de argila menor que 8 %. Adicionalmente, a porosidade média dessa camada, igual a 13,48 %, pode ser considerada moderada o que permitiria uma estocagem razoável de fluidos. Um caso parcialmente similar é a camada B soterrada a 1930 m, conformada por arenito branco amarronzado, de espessura igual a 6 m, proporção de argila menor que 5 % e porosidade média de 11,84 %. Apesar dessas características, a cor do arenito indicaria a possível presença de óxido de ferro, o que poderia ocupar o espaço poroso obstaculizando a estocagem de CO₂. Ao analisar a distância ao parque mais próximo, nota-se que este encontra-se a 12,62 km, o que poderia reduzir significativamente os custos de infraestrutura e de transporte em relação aos outros testemunhos estudados. Dessa forma, a camada A representaria uma camada apropriada para a estocagem de CO₂. No caso da camada B, seria preciso quantificar o conteúdo de óxido de ferro e analisar se, de fato, representaria um problema para a estocagem. Portanto, em princípio, a camada B não é descartada.

Tabela 5 – Parâmetros do testemunho 2-AR-1-SP

Test.	2-AR-1-SP		D.P.	12,62			Topo	1907	Base	1951		
			(km)				(m)		(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GR _{max}	GR _{min}	GR _{lido}	IGR	V _{sh}	DT _{lido}	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	1907	1915	8	114	23	36	0,1429	7,227	73	13,43	13,52	13,48
B	1930	1936	6			31	0,0879	4,277	70	11,19	12,48	11,84

Legenda detalhada na Tabela 4.

No testemunho 2-AA-1-SP (Amadeu Amaral, SP) foram identificadas quatro camadas potenciais constituídas por arenito branco (Tabela 6), litologia que não seria um impedimento para o armazenamento de CO₂. Em relação a porcentagem de argila, unicamente a camada D possui um valor maior que 15 %, considerado moderado, enquanto as demais camadas apresentam valores menores a essa porcentagem, sendo considerados baixos. Assim, a camada D poderia ter uma capacidade de estocagem reduzida, porém ainda factível. Analisando a porosidade média, notam-se valores moderados para as camadas B, C e D. Destaca-se a camada A com uma porosidade igual a 21,32 %, a qual é considerada um valor alto. Nesse contexto, todas as quatro camadas parecem ser locais apropriados para a estocagem de CO₂, com destaque para a camada A.

Tabela 6 – Parâmetros do testemunho 2-AA-1-SP

Test.	2-AA-1-SP			D.P.	49,94			Topo	1858	Base	1934	
				(km)				(m)		(m)		
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	1866	1873	7			35	0,1286	6,439	86	23,13	19,5	21,32
B	1875	1882	7	96	26	37	0,1571	8,032	71	11,94	15,08	13,51
C	1895	1900	5			40	0,2000	10,544	85	22,39	15,96	19,17
D	1906	1913	7			47	0,3000	17,019	80	18,66	18	18,33

Legenda detalhada na Tabela 4.

No testemunho 2-PP-1-SP (Paraguaçu Paulista, SP) encontraram-se duas camadas de interesse compostas por arenito branco acinzentado (Tabela 7), litologia apropriada para a estocagem de CO₂. Apesar da camada A apresentar uma contribuição mínima de argila, menor que 2 %, a sua porosidade sônica é igual a 7,46 %, que é considerada baixa e implicaria numa capacidade bastante limitada para o armazenamento de fluidos. No segundo caso, embora para a camada B foi estimada uma porosidade de 10,45 %, considerada moderada, existe um elevado conteúdo de argila, de aproximadamente 68 %, o que implicaria que o arenito seria rico em argila e apresentaria capacidades limitadas para a estocagem de CO₂. Nesse contexto, apesar da proximidade aos parques de biocombustível igual a 12,33 km, nenhuma das camadas do testemunho 2-PP-1-SP parece ser apropriada para projetos de CCS. Por tanto, o testemunho 2-PP-1-SP deveria ser descartado.

Tabela 7 – Parâmetros do testemunho 2-PP-1-SP

Test.	2-PP-1-SP			D.P.	12,33	Topo	2107	Base	2156			
				(km)		(m)		(m)				
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	2107	2112	5	120	32	35	0,0341	1,597	65	7,46	Sem	7,46
											curva	
B	2116	2121	5			103	0,8068	67,987	69	10,45	Sem	10,45
											curva	

Legenda detalhada na Tabela 4.

Analisando o testemunho 1-TI-1-SP (Tarabai, SP), foram identificadas duas camadas potenciais formadas por arenito cinza esbranquiçado (Tabela 8). Do ponto de vista mineralógico, a composição aparente das camadas permitiria o armazenamento de CO₂, o que é confirmado pelo baixo conteúdo de argila em ambas as camadas, próximo a 5 %. No entanto, porosidades médias inferiores a 10 % foram obtidas em ambas as camadas, o que é considerado um valor baixo e poderia restringir a estocagem de fluidos. Desse modo, o testemunho 1-TI-1-SP não apresenta o melhor cenário para a estocagem de CO₂, sendo descartado.

Tabela 8 – Parâmetros do testemunho 1-TI-1-SP

Test.	1-TI-1-SP			D.P.	108	Topo	3315	Base	3462			
				(km)		(m)		(m)				
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	3315	3322	7	168	18	32	0,0933	4,558	67	8,96	8,48	8,72
B	3336	3351	15			34	0,1067	5,259	67	8,96	7,9	8,43

Legenda detalhada na Tabela 4.

Para a região do PR, quatro de cinco testemunhos estudados apresentam camadas potenciais para a estocagem de CO₂. Como mencionado anteriormente, as camadas de arenito encontram-se distribuídas verticalmente ao longo da Fm. Rio Bonito na região do PR e a maior profundidade que as camadas encontradas na região de SP. Especificamente, o topo dessas camadas variam entre 2482 m e 3927 m, o que corresponde a aproximadamente 5 a 8 vezes o valor mínimo requerido para o armazenamento de CO₂. Além disso, com exceção do testemunho mais superficial na região do PR, o 2-AP-1-PR, todos os outros testemunhos apresentam camadas a partir de 2666 m, sendo, inclusive, valores superiores ao máximo de profundidade comum em testemunhos de petróleo e gás de 2554 m (PIN, 2014; EIA, 2020). Nesse contexto, os custos de infraestrutura, transporte e injeção de CO₂ incrementariam significativamente se forem comparados com as camadas potenciais encontradas na região de SP.

Continuando para o sudoeste, no testemunho 2-AP-1-PR (Apucarana, PR) observam-se duas camadas relevantes de arenito branco que deveriam permitir a estocagem de CO₂ (Tabela 9). Ambas as camadas apresentam conteúdos pequenos de argila, menores que 6 %. Adicionalmente, a camada A apresenta uma porosidade aproximada de 10 %, o que poderia ser considerado uma porosidade moderada. No caso da camada B, sua porosidade ao redor de 5 % é considerada baixa. Portanto, a camada A seria a única camada relativamente adequada para o armazenamento CO₂ no testemunho 2-AP-1-PR.

Tabela 9 – Parâmetros do testemunho 2-AP-1-PR

Test.	2-AP-1-PR		D.P.	118,7		Topo	2482	Base	2564			
			(km)			(m)		(m)				
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRLido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	2482	2488	6	85	17	25	0,1176	5,846	68	9,70	Sem	9,70
											curva	
B	2551	2564	13			22	0,0735	3,541	62	5,22	Sem	5,22
											curva	

Legenda detalhada na Tabela 4.

O testemunho 2-RI-1-PR (Rio Ivaí, PR) destaca-se devido à presença de cinco camadas potenciais compostas de arenito cinza esbranquiçado (Tabela 10), litologia que é apropriada para o armazenamento de CO₂. Em relação ao conteúdo de argila, nota-se que as camadas A, C e D têm valores superiores a 15 %, o que se interpreta como um conteúdo moderado. Por outro lado, as camadas B e E apresentam valores aproximados de 5 % e 6 %, respectivamente, considerados baixos, o que oferece maior capacidade de armazenamento. No tocante à porosidade média, todas as camadas mostraram valores considerados baixos a moderados. Assim, embora a porosidade da camada A seja considerada moderada ($\phi > 10$ %), o conteúdo moderado de argila limitaria a capacidade de armazenamento de CO₂. Caso contrário apresenta-se na camada B, devido a sua porosidade de 12,34 % e baixo conteúdo de argila, o que implicaria numa capacidade de armazenamento razoável. Considerando os mesmos fatores, as camadas C, D e E devem ser descartadas. Para as camadas C e D encontraram-se conteúdos moderados de argila e baixas porosidades, mostrando que tais camadas não seriam locais favoráveis para o armazenamento de CO₂. A camada E é um caso interessante já que apesar de ser interpretada como um arenito espesso com 14 m e baixo conteúdo de argila, a porosidade média é menor que 5 % o que é considerado um valor muito baixo e possivelmente indica uma rocha compactada ou cimentada. Dessa forma, a camada E teria uma capacidade bastante limitada para o armazenamento de CO₂. Nesse contexto, as camadas A e B seriam as mais apropriadas para a estocagem de CO₂, com a primeira camada se destacando devido à sua espessura considerável de 12 m.

Tabela 10 – Parâmetros do testemunho 2-RI-1-PR

Test.	2-RI-1-PR		D. P.		204		Topo 2666		Base 2778			
			(km)				(m)		(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	2666	2678	12			75	0,4103	25,279	67	8,96	11,43	10,19
B	2688	2695	7			40	0,1111	5,495	76	15,67	9	12,34
C	2715	2721	6	144	27	75	0,4103	25,279	65	7,46	9,55	8,51
D	2723	2729	6			63	0,3077	17,555	62	5,22	8,06	6,64
E	2764	2778	14			42	0,1282	6,419	61	4,48	5,41	4,94

Legenda detalhada na Tabela 4.

No caso do testemunho 2-CM-1-PR (Campo Mourão, PR) foram identificadas duas camadas de interesse (Tabela 11). A camada A, de espessura considerável igual a 15 m, é constituída de arenito branco, litologia apropriada para o armazenamento de CO₂. No entanto, através da análise da curva de Gamma Ray foi possível verificar um conteúdo muito alto de argila ao redor de 75 %, esperado para arenitos com alto conteúdo de argilas. Além disso, a baixa porosidade sônica calculada, menor que 10 %, indica que a camada A não seria apropriada para a estocagem de CO₂ apesar da sua considerável espessura. Por sua parte, a camada B também de espessura apreciável, igual a 8 m, apresenta um mínimo conteúdo de argila inferior a 5 %. No entanto, como no caso da camada A, sua baixa porosidade ($\phi < 10$ %) limitaria notavelmente sua capacidade de armazenamento. Assim, nenhuma das camadas do testemunho 2-CM-1-PR seriam adequadas para implementar um projeto de CCS.

Tabela 11 – Parâmetros do testemunho 2-CM-1-PR

Test.	2-CM-1-PR		D.P.		240		Topo 2873		Base 3150			
			(km)				(m)		(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	2875	2890	15	81	12	71	0,8551	74,974	65	7,46	Sem	7,46
											curva	
B	2918	2926	8			18	0,0870	4,228	63	5,97	Sem	5,97
											curva	

Legenda detalhada na Tabela 4.

O testemunho 2-AN-1-PR (Altônia, PR) contém cinco camadas de interesse, sendo o testemunho analisado neste estudo com maior espessura média igual a 10,7 m (Tabela 12). Isso é coerente com o aumento dos valores das isópacas na direção SW do modelo de Zalán (1990). Em relação à mineralogia, a camada A é formada por arenito cinza claro, as camadas B, D e E de arenito branco, e a camada C de arenito branco acinzentado, sendo, em princípio, litologias que não apresentariam maiores dificuldades para o armazenamento de

Tabela 12 – Parâmetros do testemunho 2-AN-1-PR

Test.	2-AN-1-PR		D.P. (km)	165			Topo (m)	3927	Base (m)	4073		
Cam.	Topo (m)	Base (m)	Esp. (m)	GRmax (API)	GRmin (API)	GRlido (API)	IGR	Vsh (%)	DTlido (us/ft)	porT (%)	porN (%)	por (%)
A	3927	3937	10			23	0,0396	1,862	70	11,19	9	10,10
B	3951	3964	13			25	0,0594	2,833	60	3,73	3	3,37
C	4015	4033	18	120	19	25	0,0594	2,833	63	5,97	4,65	5,31
D	4039	4044	5			25	0,0594	2,833	62	5,22	4,96	5,09
E	4051	4073	22			28	0,0891	4,339	60	3,73	3,61	3,67

Legenda detalhada na Tabela 4.

CO₂. Estudando o conteúdo de argila, todas as camadas apresentam valores inferiores a 5 %, o que as identifica como arenitos limpos (de baixa argilosidade). No entanto, no tocante à porosidade média, só a camada A supera os 10 %, o que se interpreta como porosidade moderada. No caso das camadas C e D, calcularam-se valores iguais a 5,31 % e 5,09 %, respectivamente, os quais são considerados porosidades baixas. Finalmente, as camadas B e E apresentam valores menores que 5 %, sendo classificados como porosidade muito baixa. Dessa forma, a camada A seria a única camada com capacidade de armazenamento razoável.

Em relação à Fm. San Miguel, observa-se que, apesar da presença de diversas camadas de arenito no testemunho IG-1 (Tabela 13), nenhum das camadas encontram-se a profundidades superiores a 800 m, sendo a profundidade mínima requerida para a injeção de CO₂ em fase supercrítica (HOLLOWAY; SAVAGE, 1993). Mesmo que este único critério limitante seja desconsiderado, apenas duas camadas possuem características apropriadas para o armazenamento de CO₂. A camada A está constituída por dois tipos de arenito, branco e cinza claro. Tais cores são associadas a arenitos compostos principalmente de silicatos, o que deveria permitir a estocagem. Essa camada mostrou um conteúdo de argila maior que 15 %, o que é considerado moderado. No entanto, a sua porosidade média é maior que 20 %, o que permite identificar a camada como um arenito de alta porosidade. Portanto, a camada A parece possuir uma capacidade de armazenamento significativa, que, embora possa ser ligeiramente limitada pelo conteúdo de argila presente, continua sendo uma excelente candidata para o armazenamento de CO₂. A camada B é composta por arenito branco e cinza escuro, o que deveria possibilitar a estocagem. Além disso, essa camada apresenta um conteúdo mínimo de argila, menor que 5 %, e uma porosidade média moderada, o que poderia permitir um armazenamento razoável de CO₂. Apesar dessas características, ambas as camadas A e B estão situadas a profundidades inferiores a 800 m, o que não é adequado para a injeção de CO₂ em fase supercrítica (HOLLOWAY; SAVAGE, 1993). No entanto, estudos recentes indicam a viabilidade da injeção de CO₂ em outras fases, dispensando a necessidade de profundidades acima de 800 m (AL-SHARGABI et

Tabela 13 – Parâmetros do testemunho Ines G-1

Test.	IG-1		D.P.	319			Topo	646	Base	741		
			(km)				(m)		(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)
A	655	662	7	120	15	47	0,3048	17,350	85	22,39	22	22,19
B	714	723	9			16	0,0095	0,439	76	15,67	17	16,34

Legenda detalhada na Tabela 4.

al., 2022).

No caso do testemunho IG-2 foram encontradas quatro camadas de interesse (Tabela 14). No entanto, só as camadas C e D estão depositadas a profundidades superiores a 800 m. A camada A é formada por arenito cinza esbranquiçado a esverdeado, isto é, uma composição mais silicática a uma mais argilosa. Dos cálculos foi obtido um conteúdo de argila maior que 15 %, o que é interpretado como um valor moderado. Além disso, a camada A apresenta a melhor porosidade média calculada entre todas as camadas estudadas nesta pesquisa, ao redor 25 %, indicando uma capacidade considerável para a estocagem de fluidos. Caso relativamente similar é a camada B, formada de arenito branco e cinza claro, devido a apresentar o menor valor na curva de GR, o que foi interpretado como um arenito "limpo" com mínimo conteúdo de argila que não seria um obstáculo para a estocagem de fluidos. Adicionalmente, a porosidade é maior que 10 %, o que corresponde a um valor moderado. Nesse contexto, ambas as camadas A e B exibem capacidades de armazenamento de fluido moderadas. Contudo, não seriam apropriadas para o armazenamento de CO₂ em fase supercrítica, uma vez que estão localizadas em profundidades inferiores a 800 m (HOLLOWAY; SAVAGE, 1993). Por outro lado, ambas as camadas poderiam ser consideradas candidatas adequadas para a injeção de CO₂ em outras fases que não exigem profundidades superiores a 800 m (AL-SHARGABI et al., 2022). A camada C, de composição semelhante à anterior, é uma melhor candidata. Primeiramente, a camada C está situada a partir de 844 m, profundidade superior ao mínimo requerido para a injeção de CO₂ em fase supercrítica. Em segundo lugar, apesar de ter um conteúdo de argila maior ao da camada B, o conteúdo de argila considera-se baixo (menor que 15 %). Adicionalmente, a porosidade média calculada é maior que 20 % entrando no nível de alta porosidade. Também, destaca-se a considerável espessura da camada, igual a 27 m, excedendo mais de cinco vezes o valor mínimo necessário para a estocagem de CO₂. Desse modo, a camada C mostra uma notável capacidade de armazenamento. Finalmente, a camada D, composta de arenito branco, exibe um alto conteúdo de argila, maior que 30 %, o que pode limitar de forma considerável a capacidade de armazenamento. No entanto, a camada exibe uma porosidade maior que 20 %, considerada alta. Adicionalmente, a espessura da camada é mais do que o dobro do mínimo necessário para o armazenamento

de CO₂. Por tanto, a camada apresenta uma porosidade, aparentemente pode de estar limitada pelo conteúdo de argila, e uma espessura considerável que a torna uma possível candidata para o armazenamento de CO₂. Resumindo, unicamente as camadas C e D do testemunho IG-2 são candidatas factíveis para a injeção de CO₂ em fase supercrítica.

Tabela 14 – Parâmetros do testemunho Ines G-2

Test.	IG-2		D.P.		320,4			Topo	643	Base		927	
			(km)				(m)			(m)			
Cam.	Topo	Base	Esp.	GRmax	GRmin	GRlido	IGR	Vsh	DTlido	porT	porN	por	
	(m)	(m)	(m)	(API)	(API)	(API)		(%)	(us/ft)	(%)	(%)	(%)	
A	643	649	6			70	0,3271	18,934	90	26,12	23	24,56	
B	662	667	5	142	35	35	0	0	72	12,69	15	13,84	
C	844	871	27			60	0,2336	12,623	85	22,39	21	21,69	
D	871	883	12			92	0,5327	36,062	83	20,90	21	20,95	

Legenda detalhada na Tabela 4.

Utilizando os limitados dados disponíveis das curvas de perfilagem geofísica do testemunho ML-1 foram identificadas três camadas potenciais, caracterizadas na Tabela 15 e visualizadas na Fig. 31. Da descrição macroscópica (amostras ML-11 e ML-14 apresentadas no Apêndice A), a camada A pode ser dividida em duas partes. A parte superior apresenta uma composição maiormente de arenito de cor cinza com intercalações de siltito com cor marrom acinzentada escura. Isto indica que a camada tem uma composição principalmente silicática, porém apresenta siltitos com granulação menor e com uma cor que representaria a presença de óxidos de ferro, que ocupariam o espaço poroso da camada. A parte inferior foi interpretada como um arenito marrom acinzentado com laminações de silte e argila, com cor preta. Nesse contexto, nota-se um aumento da presença de óxidos de ferro e de litologias com menor tamanho de grão na parte inferior da camada o que diminuiria o espaço poroso. No entanto, em média, há um conteúdo baixo de argila menor que 15 %. Adicionalmente, a porosidade efetiva é maior que 20 %, o que é interpretado como alta porosidade. Apesar de a camada A apresentar uma capacidade significativa para o armazenamento de fluidos, especialmente em sua parte superior, não pode ser considerada uma candidata adequada para a injeção de CO₂ em fase supercrítica devido à sua profundidade inferior a 800 m. Por outro lado, a camada A poderia ser utilizada para a injeção de CO₂ em outras fases que não requerem profundidades maiores a 800 m (AL-SHARGABI et al., 2022). Em relação às camadas B e C, ambas são formadas por arenito marrom escuro, coloração que sugere a presença de um elevado teor de óxidos de ferro. Especificamente, a camada B apresenta um alto conteúdo de argila, superior a 30 %, e uma moderada porosidade, inferior a 20 %. Essas características sugerem uma capacidade de armazenamento reduzida para o CO₂ nessa camada. De maneira semelhante, a camada C também exhibe um elevado conteúdo de argila, superior a 30 %, e uma porosidade moderada, inferior a 20 %, juntamente com uma coloração indicativa de

Tabela 15 – Parâmetros do testemunho ML-1

Test. ML-1	D.P. (km)	323,8	Topo (m)	515,42	Base (m)	1253,34	
Cam. Topo (m)	Base (m)	Topo (ft)	Base (ft)	Esp. (m)	VSh (%)	porE (%)	
A	712,87	720,06	2338,91	2362,52	7,19	8,14	21,72
B	729,01	735,97	2391,87	2414,72	6,96	36,2	13,57
C	736,85	747,72	2417,62	2453,27	10,87	47,51	11,31

óxidos de ferro, o que também poderia resultar em uma capacidade de armazenamento consideravelmente reduzida.

4.5 Resultados das análises de amostras selecionadas do testemunho ML-1 com o equipamento MSCL

Primeiramente, convém recordar que a aquisição dos dados foi realizada a cada dois milímetros (2 mm) no equipamento MSCL, o que permite caracterizar as amostras de forma bastante detalhada e, assim, notar variações mínimas de radiação, ligadas à diversidade de litologia ou conteúdo de elementos radioativos, e de susceptibilidade magnética, estando ligadas ao conteúdo de elementos ferromagnéticos e ferrimagnéticos. Dessa forma, é evidente a vantagem da técnica de Espectrometria Gama Natural sobre as curvas de GR usada na perfilagem geofísica de testemunhos em termos da resolução dos dados.

Nos Apêndices B e C são exibidos as imagens RGB e os resultados de espectrometria gama natural, susceptibilidade magnética e medição dos elementos K, Th, U, Fe, Ni, Ca, Rb, Sr e Ti das 15 amostras selecionadas do testemunho ML-1.

Em relação às imagens RGB completas dos dois grupos de amostras selecionadas, estas podem ser visualizadas no Apêndice B, mantendo a mesma ordem já descrita tanto na metodologia (Tabelas 2 e 3) como na seção anterior (Tabelas 21 e 22).

Na curva de espectrometria gama natural, medida em contagens por segundo (cps), os vales indicam rochas sedimentares com uma reduzida quantidade de elementos radioativos (baixas contagens de radiação gama), como costuma ocorrer em arenitos e calcários. Por outro lado, os picos denotam uma elevada presença de elementos radioativos (contagens de radiação gama elevadas), o que é observado em rochas como folhelhos e com presença significativa de argila.

Na curva de susceptibilidade magnética, medida em 10^{-5} SI, os vales representam rochas com menores abundâncias de elementos com tendência a serem magnetizados por um campo magnético externo, principalmente, elementos ferromagnéticos como Fe e Ni. Em contraste, os picos exibem rochas com maiores abundâncias desses mesmos elementos. Nos casos onde foram registrados valores negativos, esses são indicativos de elementos

diamagnéticos, isto é, elementos que enfraquecem o campo magnético externo exercido sobre a amostra. Nesses casos o coeficiente de variação não foi calculado já que medida estatística precisa de um conjunto de dados unicamente positivos para ser calculado (UCLA, 2022).

As curvas elaboradas para as concentrações de elementos químicos medidos em ppm mostram, em alguns casos, valores nulos, indicando conteúdos desprezíveis do elemento medido. Os elementos selecionados influem em diferentes propriedades físicas e químicas das amostras. Os elementos K, Th e U estão relacionados à radiação natural da amostra. Os elementos Fe e Ni são considerados elementos ferromagnéticos que estão ligados à suscetibilidade magnética. Os elementos Fe e Ca têm a capacidade de formar carbonatos ao interagir com o CO₂, permitindo o seu armazenamento na forma de minerais de carbonato de ferro ou cálcio, respectivamente. Os elementos Rb e Sr podem estar associados ao mineral feldspato, o qual pode interagir com o CO₂ para formar carbonatos, enquanto os elementos Fe, K e Ti podem estar relacionados ao mineral mica.

As interpretações para cada amostra pertencente ao grupo 1 (Tabela 2), o qual forma parte de uma espessa camada de arenito branco com siltito cinza escuro no testemunho ML-1 (Fig. 31), estão apresentadas a seguir.

Com respeito à espectrometria gama natural, a amostra ML-74 apresenta uma média maior à média geral de todo o perfil espectrométrico (Apêndices B3 e C1). Dessa forma, é possível estabelecer que a amostra contém relativamente maior quantidade de elementos radioativos em relação às outras amostras do grupo 1. De forma mais específica, observa-se que entre 1151,45 m e 1151,49 m foram registrados os menores valores de radiação gama natural, o que poderia indicar arenitos com menor conteúdo de argila que em outras partes da amostra. No entanto, destacam-se dois picos que poderiam ser identificados como siltitos. Isto é confirmado pelo tamanho de grão das laminações descritas na análise macroscópica e com o aporte do elemento U, o qual apresenta uma curva similar à da radiação gama. Na parte intermediária, entre 1151,49 m e 1151,56 m, notam-se os valores mais altos, o que poderia indicar um aumento na quantidade de siltitos presentes. Esse comportamento da curva de radiação parece estar mais ligado à contribuição de K que mostra um padrão similar e também de U já que aumenta seu aporte na mesma região. Na parte inferior, identificou-se uma diminuição gradual em direção à base da amostra, o que pode estar relacionado a uma maior presença de arenitos e menor conteúdo de siltitos com contribuição de U.

Em relação à susceptibilidade magnética, a amostra exibe uma média de $6,25 \cdot 10^{-5}$ SI, a qual é superior à média geral do grupo 1, igual a $4,65 \cdot 10^{-5}$ SI. Isso indicaria um maior conteúdo de elementos com tendência a serem magnetizados na amostra com respeito ao restante das amostras. Adicionalmente, a média de susceptibilidade encontra-se no limite inferior da faixa de valores registrados para rochas sedimentares (Fig. 20). Estudando os

elementos associados a esta propriedade física, não foram identificadas semelhanças entre as curvas de susceptibilidade e as de Fe e Ni. Portanto, é possível que a variação desse parâmetro esteja principalmente relacionada ao tamanho de grão, com um tamanho maior na parte superior e inferior da amostra, e um tamanho menor na parte intermediária. Essa observação é coerente com a análise da curva de gama natural descrita anteriormente.

Os elementos encontrados na amostra ML-74 podem ser analisados com respeito aos valores da composição da crosta continental superior segundo McLennan (2001) (Anexo A). Primeiro, estudam-se os elementos ligados à radioatividade natural, o valor médio de K é menor que o da crosta. Por sua parte, os valores de Th e U são significativamente maiores que os valores encontrados na crosta. No entanto, observa-se que o coeficiente de variação é significativamente alto, indicando alta heterogeneidade nos valores. Em relação aos elementos relacionados à susceptibilidade magnética, as quantidades de Fe e Ni são maiores aos valores registrados para a crosta. Finalmente, dos elementos associados à mineralização de CO₂, entre os quais está incluído o Fe, os valores de Ca e Ti encontrados são maiores aos registrados para a crosta, enquanto os de Rb e Sr são menores. Dessa forma, a exceção de Th, U e Sr, todos os outros elementos estão na mesma escala de valores que aqueles encontrados na crosta continental superior.

Outro aspecto que pode ser analisado, é a relação entre os elementos e os minerais que podem ser relevantes para o armazenamento de CO₂. As curvas de K, Fe e Ti, associado ao mineral mica, apresentam certa similitude. Observa-se uma possível concentração de mica entre 1151,47 m e 1151,5 m que diminui e posteriormente aumenta novamente até a parte intermediária. Posteriormente, só nas curvas de K e Ti, nota-se um aumento significativo o que poderia indicar um incremento no conteúdo de mica até a parte inferior da amostra. No caso do mineral feldspato, nota-se que as curvas dos elementos Rb e Sr não demonstram semelhanças.

No entanto, ao compararmos as médias desses elementos com os valores típicos encontrados na crosta continental superior, observa-se que o teor de Sr é consideravelmente inferior ao que normalmente é encontrado na crosta. Por outro lado, o teor de Rb, embora inferior em relação aos valores da crosta, mantém-se próximo a esses valores.

No caso da amostra ML-73 (Apêndices B4 e C1), nota-se que a média de gama natural é superior à média do grupo 1, indicando que contém maior conteúdo de elementos radioativos que outras amostras do grupo. Com exceção de alguns picos e vales, a curva de gama natural encontra-se ao longo do eixo do valor médio, indicando que em quase toda a amostra apresentam-se variações similares. Isto também é confirmado com o baixo coeficiente de dispersão, o que representa relativa uniformidade nos dados, e a descrição macroscópica da rocha, a qual indica laminações paralelas de arenito médio a fino. Ao comparar a curva de gama natural com as de elementos associados, não se observam tendências similares em nenhum caso. Esse contexto pareceria indicar que a granulometria

seria o fator principal associado às mudanças na curva de gama natural.

Com respeito à susceptibilidade magnética, esta é superior ao valor médio do grupo 1, indicando que há um maior conteúdo de elementos que podem ser magnetizados que em outras amostras. Nota-se um aumento gradual do topo a base; no entanto, os valores estão em torno da média da amostra o que é evidenciado pelo baixo coeficiente de variação. Estudando a relação entre a propriedade física e os elementos associados, nota-se que a curva da susceptibilidade e a do Fe são similares, o que indica uma associação direta entre o conteúdo de Fe e a susceptibilidade magnética da amostra.

Ao avaliar o teor de elementos radioativos em comparação com os valores da crosta continental superior, identificam-se notáveis discrepâncias. A média de K na amostra é inferior aos valores típicos da crosta, enquanto os teores de Th e U são consideravelmente mais elevados. No que diz respeito aos elementos ferromagnéticos, Fe e Ni exibem médias inferiores em relação à crosta, embora estejam na mesma ordem de grandeza. Por outro lado, ao analisar os elementos associados à mineralização de CO₂, observa-se que apenas o teor de Ti está acima dos valores registrados na crosta. Entre os elementos com teores inferiores, apenas o Ca se encontra na mesma ordem de magnitude que os valores típicos da crosta.

No tocante aos minerais relevantes para o armazenamento de CO₂, os elementos associados à mica (K, Fe e Ti) apresentam curvas similares. Isto permite identificar quatro picos relacionados a maiores concentrações de mica nas profundidades de 1152,57 m, 1152,7 m, 1152,75 m e 1152,77 m, o que também pode ser verificado pelos estratos horizontais escuros na imagem RGB. Em relação ao feldspato, a curva de Sr é relativamente uniforme, tendo valores ao redor da média, o que poderia indicar uma distribuição homogênea de feldspato ao longo da amostra, sem apresentar concentrações significativas em nenhuma parte específica.

A amostra ML-71 (Apêndices B5 e C1) exhibe uma média de gama natural inferior à de grupo 1, o que poderia indicar um menor conteúdo de elementos radioativos que no resto de amostras. Nota-se uma variabilidade baixa nos valores, representada pelo coeficiente de variação. Comparando a curva de gama natural com as dos elementos associados à radioatividade, observa-se que no topo da amostra alguns picos poderiam ser resultado do aporte de K principalmente, comportamento que continua até a parte inferior. Observa-se que a granulometria das laminações parece ter maior influência nas variações de radiação. Os picos estariam associados a granulações inferiores descritas como areia fina ou com maior conteúdo de argila. Não se identificam concentrações de nenhum tipo ao longo da amostra, o que é coerente com a distribuição homogênea de picos e vales ligados a granulações mais grossas e finas observadas na imagem RGB.

A susceptibilidade magnética apresenta uma média superior à do grupo, sendo interpretado como um maior conteúdo de elementos ferromagnéticos na amostra. Do

coeficiente de variação, determina-se uma baixa variabilidade dos valores registrados. Observa-se certa influência do Fe e, em segunda medida, do Ni nas variações magnéticas da amostra. Adicionalmente, do topo à base identificam-se diversos picos e vales distribuídos de forma relativamente homogênea, possivelmente associados a aumentos e diminuições de minerais magnéticos e variações granulométricas.

Comparando os teores dos elementos encontrados com os encontrados na crosta superior, observa-se que o teor de K é inferior, inclusive sendo quase a metade do valor registrado na crosta, enquanto os teores de Th e U são significativamente maiores aos encontrados na camada litosférica. Para o caso dos elementos ferromagnéticos, Fe e Ni, ambos mostram teores da mesma ordem de magnitude, porém, que são inferiores aos valores da crosta. No caso dos elementos relevantes para a mineralização de CO₂, todos exibem quantidades menores aos valores típicos da crosta embora na mesma ordem de magnitude. Os elementos Ca e Sr são notavelmente inferiores.

Estudando os elementos associados às micas, as curvas de K e Ti mostram certa semelhança, apresentando a mesma tendência de incremento do topo à base. Isto sugere que há uma maior presença de mineral mica na parte inferior da amostra. Em relação aos feldspatos, nas profundidades 1164,3 m, 1164,32 m e 1164,35 m apresentam-se teores de Rb próximos ou até mesmo superiores ao valor típico da crosta. Além disso, considerando que o teor de Sr é significativamente inferior à média da crosta, em tais profundidades parecer existir maior concentração de feldspatos associados essencialmente ao Rb.

No perfil de radiação gama natural da amostra ML-72 (Apêndices B6 e C1), aprecia-se um mínimo coeficiente de variação, indicando uma baixa dispersão nos valores adquiridos. Ao comparar a média da amostra com a do grupo, nota-se que a primeira é inferior à segunda, o que poderia ser interpretado como um menor conteúdo de minerais associados à radioatividade na amostra. A curva mostra um padrão de serra caracterizado por diversos picos e vales ao longo da extensão vertical, sem fortes tendências em nenhuma parte da amostra. Possivelmente, estaria relacionado à variação do tamanho de grão verticalmente, resultando nas laminações claras e escuras interpretadas como areia fina e média, tonalidade amarela, cor cinza a preta. Tais laminações observam-se de forma mais definida na parte superior da amostra. O primeiro pico parece estar associado ao aporte de K e U no topo, o segundo seria caracterizado pela contribuição de U, o terceiro e quarto parecem estar relacionados ao aporte de Th, mostrando padrões similares com a curva de radiação gama.

No tocante à susceptibilidade magnética, observa-se um baixo coeficiente de variação o que indica uma distribuição homogênea dos valores registrados. Ao ser comparadas as médias do grupo 1 e da amostra, a última exhibe um valor superior, o que aponta a que ML-72 apresenta maior conteúdo de elementos ferromagnéticos que o resto de amostras. Identifica-se uma diminuição relativamente gradual de topo a base, o que seria interpretado

como menores conteúdos de elementos ferromagnéticos na parte inferior da amostra. É importante destacar que a amostra não cobre toda a largura do cilindro de transporte, o que pode estar relacionado com a queda na susceptibilidade magnética. Essa queda na susceptibilidade pode ser atribuída ao fato de que o sensor está analisando não apenas a amostra, mas também o espaço vazio ou material não metálico correspondente ao cilindro de transporte. Ao estudar as curvas de Fe e Ni, nota-se que os altos valores de susceptibilidade na parte superior estariam associados a contribuições de Fe, no entanto, na parte intermediária algumas contribuições de Ni poderiam ser as de maior influência.

Comparando os elementos registrados com os da crosta continental superior, dos elementos associados à radioatividade, unicamente o K exibe um valor inferior ao valor esperado na crosta, inclusive representando menos do 30 % do valor esperado. Por sua parte, o Th e o U expõem teores significativamente superiores aos encontrados na crosta. No entanto, como nos casos anteriores, os altos coeficientes de variação indicariam a presença de valores anômalos, isto é, concentrações dos elementos bem específicas presentes na amostra, representadas pelos escassos picos nas curvas de Th e U. Em relação aos elementos ferromagnéticos, tanto o Fe como o Ni exibem valores inferiores aos registrados na crosta superior, ainda assim, estão na mesma ordem de magnitude. Dos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, unicamente a média de Ti apresenta uma ordem de magnitude igual à do valor típico da crosta, porém ainda sendo inferior, como no caso dos outros elementos associados ao armazenamento. Assim o Ca, o Rb e o Sr exibem médias inferiores ao 50 % dos teores da crosta.

Em relação as micas, os elementos K, Ti e Fe apresentam curvas similares, as quais apresentam valores altos na parte superior da amostra e que são interpretados como maior conteúdo de mineral mica nesse segmento. Tais acumulações parecem encontrar-se nas laminações mais escuras mostradas na imagem RGB. No caso dos feldspatos, já que tanto o Rb quanto o Sr tem valores significativamente menores aos encontrados na crosta superior, seria um indicador de concentrações mínimas de feldspato. Além disso, tais concentrações estariam associadas ao aporte de Sr, representadas pelos picos ao longo da curva e com maior presença desde a parte intermediária à base da amostra.

No caso da amostra ML-69 (Apêndices B7 e C1), a média de radiação gama natural é inferior à média calculada para o grupo 1, o que se interpreta como um menor conteúdo de elementos radioativos ou granulometrias maiores que em outras amostras. A amostra encontra-se dividida em vários segmentos, os quais são representados na curva de radiação gama exibindo diversos picos e vales ao longo do eixo vertical. Parece haver que na os segmentos superiores os valores são menores que os encontrados nos segmentos intermediários. Como é observado em todas as curvas da amostra, devido à fragmentação do segmento inferior não foi possível obter o total das curvas desse segmento. Em relação aos elementos radioativos, a curva de K exibe um padrão relativamente similar ao da

curva de radiação gama, mostrando valores inferiores no topo e valores superiores na parte intermediário, indicando que o elemento K tem maior influência no registro de radiação. Isto é coerente com as observações macroscópicas da amostra ML-69, as quais descrevem granulometrias similares de base a topo, porém com diferença nas cores, sendo mais clara no topo (cor cinza esverdeada) e mais escura na parte intermediária à base (cor cinza muito escura), o que pode estar associado à presença de micas as que a sua vez estariam ligadas ao elemento radioativo K.

Estudando a susceptibilidade magnética, a sua média é inferior à do grupo 1, o que indicaria um menor conteúdo de elementos ferromagnéticos na amostra. Por outro lado, o baixo coeficiente de variação indicaria pouca dispersão dos dados. Em relação ao padrão da curva, observam-se diversos picos e vales a longo do eixo vertical. No entanto, parece haver um aumento gradual de topo a base. Estudando os elementos ferromagnéticos, é interessante observar que apesar dos teores de Fe na parte superior, estes não são refletidos na curva de susceptibilidade, o que poderia indicar que o Ni tem maior influência no registro magnético, embora que não esteja presente em todo o comprimento da amostra.

Como em casos anteriores, os teores foram comparados com aqueles encontrados na crosta continental superior. Dos elementos associados à radiação natural, o Th e U exibem valores substancialmente superiores aos registrados na crosta. No caso do K, este apresenta um teor menor ao característico da crosta, representando um pouco mais do 50 % desse teor característico. Em relação aos elementos ferromagnéticos, o Fe apresenta um teor menor ao valor típico da crosta, porém na mesma ordem de magnitude. Por sua parte, o Ni apresenta um valor próximo ao valor típico. Dos elementos associados ao armazenamento de CO₂, unicamente o Ca apresenta um teor significativamente superior ao registrado na crosta, inclusive sendo mais do duplo do valor registrado. Por outro lado, Rb, Sr e Ti exibem teores substancialmente inferiores a aqueles encontrados na crosta.

Em relação às micas, na parte superior da amostra observa-se a influência dos três elementos associados Fe, K e Ti, situação representada por valores altos no começo das curvas. Isto indicaria a possível concentração de micas associadas aos três elementos na parte superior da amostra. Em contraste, as curvas de K e Ti exibem comportamentos similares na parte intermediária, indicando maior concentração de feldspatos associados a esses elementos. No caso dos elementos associados ao feldspato, é interessante observar que as curvas de Rb e Sr são praticamente representações especulares uma da outra, isto é, enquanto o Rb exibe picos, o Sr exibe vales e ao contrario. No entanto, considerando que o teor de Rb é mais próximo ao registrado na crosta continental superior e o teor de Sr é consideravelmente inferior ao teor típico da crosta, possivelmente o Rb é tem maior relevância na composição dos feldspatos encontrado ao longo da amostra.

No caso da amostra ML-70 (Apêndices B8 e C1), aprecia-se que há um baixo coeficiente de variação para a radiação gama natural, indicando pouca dispersão nos

valores registrados. Comparando ambas as médias do grupo 1 e da amostra, a última é inferior, o que se interpreta como menor conteúdo de elementos associados à radiação natural em relação às outras amostras do grupo. Da curva identificam-se três regiões a primeira com limite inferior a 1191,99 m, a segunda chega até 1192,05 m e a terceira termina na base. Observam-se valores menores na região superior que vão aumentando relativamente até a segunda região e finalmente diminuem gradualmente novamente até a base. Isto é coerente com os três segmentos descritos macroscopicamente, sendo o primeiro de areia fina cor preta, o segundo de areia fina cinza escura e o terceiro de areia muito fina cor preta. Por outro lado, das curvas de elementos associados, não é possível encontrar semelhanças com a curva de radiação gama. Isto poderia indicar que o comportamento da curva de radiação está principalmente associada a variações granulométricas.

Ao observar o coeficiente de variação da susceptibilidade magnética, nota-se que exibe um valor baixo, o que é interpretado como baixa distribuição dos valores registrados. Por outro lado, a média de susceptibilidade do grupo 1 é consideravelmente maior à média da amostra ML-70. Isso sugere que a amostra é conformada por um conteúdo significativamente menor de elementos ferromagnéticos em relação ao resto de amostras. Estudando a curva, observa-se um aumento gradual de topo até quase o final da amostra, onde novamente há uma queda. Isso indicaria um aumento do conteúdo de elementos ferromagnéticos principalmente na parte intermediária, o que se verifica com a curva de Fe, a qual exibe picos importantes na parte intermediária e novamente uma queda na parte final. Devido a que a curva de Ni exibe valores pouco apreciáveis, as variações na curva de susceptibilidade parecem estar mais associadas às contribuições de Fe.

Desenvolvendo a comparação entre os teores da amostra e os encontrados na crosta continental superior, nota-se que o teor de K representa unicamente mais do 50 % do teor típico da crosta. Por sua parte, os teores de Th e U são significativamente superiores aos encontrados na crosta. Em relação aos elementos ferromagnéticos, tanto o Fe como o Ni apresentam teores menores aos da crosta, porém na mesma ordem de magnitude. No tocante aos minerais associados ao armazenamento de CO₂, o teor de Ca é consideravelmente superior ao valor registrado na crosta, sendo quase o duplo. No caso do Rb, embora o seu teor é inferior, este encontra-se ao redor do valor típico. Em contraste, tanto o Sr e o Ti exibem teores significativamente menores aos da crosta continental.

Em relação às micas, no topo da amostra as curvas de elementos associados, Fe, K e Ti apresentam valores altos. Adicionalmente, ao considerar tanto a descrição macroscópica como a imagem RGB, foram identificadas laminações paralelas de cor preta, que poderiam estar relacionadas a micas contendo os três elementos. No entanto no intervalo 1191,97 m - 1192 m, as micas parecem estar associadas principalmente ao K e Ti, devido a queda na curva de Fe nesse intervalo o que não exibe um comportamento similar com as outras duas curvas de elementos associados. Aproximadamente na profundidade 1192,01 m, identificou-

se uma laminação de cor escura, a qual poderia estar ligada à presença de mica contendo Fe, K e Ti. O outro pico importante encontra-se a 1192,08 m de profundidade, o qual só é observado na curva de Fe. Isso se verifica com a presença de uma lamina de cor preta na base da amostra, a que poderia estar conformada por mica contendo Fe. Estudando os elementos associados ao feldspato, as curvas de Rb e Sr apresentam uma imagem especular, isto é, uma aumenta enquanto a outra diminui. No entanto, considerando que o teor do Rb está mais próximo ao teor típico encontrado na crosta continental superior, é possível que a presença de feldspatos possa ser associada à acumulações de Rb. Isso pode ser verificado nos estratos mais claros tanto na parte superior quanto a inferior como pode ser observado na imagem RGB.

Dessa forma, é possível sintetizar as comparações descritas anteriormente para o Grupo 1 na Tabela 16 a seguir.

Tabela 16 – Médias de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética e teores de elementos químicos de amostras do Grupo 1.

Dado Ref.	Amostra	Média	74	73	71	72	69	70
	ML							
	Prof. (m)		1151,2	1152,1	1163,5	1164,5	1189,9	1190,6
G1	N.G. (cps)	90,63	91	91,5	90,07	90,26	90,04	90,49
	M.S. (10^{-5} SI)	4,65	6,25	5,39	4,92	5,48	3,34	2,92
Crosta Sup.	K (ppm)	28000,0	22085,16	17426,4	15921,16	8517,46	17665,99	17182,87
	Th (ppm)	10,7	82,58	76,41	72,37	77,3	84,23	87,79
	U (ppm)	2,8	30,86	32,58	28,64	37,36	49,58	37,37
	Fe (ppm)	35000,0	38051,12	25942,25	24619,2	25976,95	19557,89	17176,44
	Ni (ppm)	44,0	35,76	29,59	32,01	25,43	32,72	27,05
	Ca (ppm)	30000,0	31293,58	25355,17	16272,05	12003,81	61442,24	54128,48
	Rb (ppm)	112,0	89,6	65,44	89,44	33,62	86,05	108,57
	Sr (ppm)	350,0	106,36	100,88	111,83	129,85	97,71	101,23
	Ti (ppm)	4100,0	4718,75	4158,24	3041,58	3054,02	2821,4	2275,09

Os valores em negrito representam valores superiores à média do dado de referência.

É preciso lembrar que o grupo 2 (Apêndice C2) de amostras selecionadas exhibe

uma maior heterogeneidade e número de amostras, totalizando 9, já que são amostras características associadas a camadas de interesse baseadas no perfil litológico do testemunho ML-1 31 e as camadas com maior potencial para estocagem de CO₂ 20. Os resultados são analisados a seguir:

A amostra ML-11 (Apêndices B9 e C2) exibe uma média de radiação gama natural menor que a média geral do grupo 2, sugerindo um menor conteúdo de elementos radioativos com respeito às outras amostras do grupo. Observa-se também um coeficiente de variação baixo, indicando uma mínima variabilidade dos valores ao redor da média. Estudando a curva de radiação, identificam-se três segmentos na amostra. Um primeiro segmento representado por valores baixos entre 713,02 m e 713,04 m; o segundo segmento é representado pelo aumento dos valores os quais são mantidos relativamente até os 713,1 m de profundidade, onde estão os maiores picos da curva; e o terceiro segmento representado por quedas e aumentos, não superando os valores registrados no segundo segmento, até o fim da amostra. Considerando a descrição macroscópica e observando a imagem RGB, o primeiro segmento corresponderiam ao estrato de areia media cinza clara tendo menor conteúdo de elementos associados à radioatividade natural, o segundo segmento interpreta-se como laminações paralelas de areia media cor cinza clara (vales da curva) e areia fina cor marrom acinzentada escura (picos da curva), finalmente, o terceiro segmento também exibe laminações paralelas, porém menos definidas e com menor conteúdo de elementos radioativos. Em relação aos elementos associados, as curvas de K e Th parecem ter maior contribuição em certas partes da amostra. Nas profundidades de 713,04 m, 713,06 m e 713,07 m, identificam-se picos na curva de radiação que poderia estar associado aos incrementos visualizados na curva de Th. De forma geral, porém não de forma tão precisa, a curva de K parece contribuir à variação da curva de radiação gama, especialmente no intervalo de maior resposta radioativa. Por outro lado, ressalta a curva de K no fim da amostra devido a ter um comportamento contrario ao da curva de radiação gama. Da mesma forma, a curva de Th parece não ter algum tipo de influência significativa nessa parte da amostra.

Em relação à susceptibilidade magnética, aprecia-se que a média é inferior à média do grupo. Isso sugere que a amostra ML-11 apresenta um conteúdo menor de elementos ferromagnéticos em relação às outras amostras do grupo 2. Por outro lado, o coeficiente de variação mostra que existe uma variabilidade mínima dos valores registrados ao redor da média. No entanto, é preciso reconhecer que inclusive o valor máximo da susceptibilidade, igual a $1,9 \cdot 10^{-5}$ SI, é, praticamente, desprezível. Analisando a curva, nota-se um aumento da susceptibilidade de topo a base, sugerindo um incremento gradual de elementos ferromagnéticos. Isso é coerente com a curva de Fe, a qual verifica esse aumento gradual até a base da amostra.

Ao comparar os teores dos elementos analisados com os da crosta continental

superior, foi possível verificar que o teor de K é consideravelmente inferior ao teor típico da crosta. Por sua parte, os teores de Th e U são substancialmente superiores aos da crosta. No tocante aos elementos ferromagnéticos, tanto o Fe quanto o Ni exibem teores significativamente menores aos encontrados na crosta. No caso dos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, unicamente o teor de Ca é substancialmente superior ao valor típico. Em contraste, os teores de Rb, Sr e Ti são significativamente inferiores aos valores típicos da crosta continental superior.

Estudando os elementos associados às micas, aprecia-se que as curvas de Fe, K e Ti apresentam a mesma tendência crescente em direção à base, o que poderia indicar uma maior presença de micas em direção à base da amostra. Usando como referências a curva de Ti e a imagem RGB, identificam-se quatro picos relevantes. O primeiro, localizado a 713,04 m de profundidade, parece representar um estrato cor marrom acinzentada escura que pode conter mica associadas ao Ti. O segundo pico, localizado a 713,065 m, poderia estar relacionado ao grupo de estratos paralelos claros e escuros, o que pode ser verificado na curva de K onde há um incremento desde os 713,04 m. Assim, a presença de micas nessas profundidades estaria associada tanto ao K quanto a Ti. Os dois últimos picos localizados a 713,11 m e 713,14 m, respectivamente, teriam contribuição dos três elementos associados. Como se observa na imagem RGB, tais picos representariam os estratos escuros pouco definidos que contêm micas com aportes de Fe, K e Ti.

Em relação aos feldspatos, o Rb e o Sr apresentam curvas similares com valores máximo em quase toda amostra. Isso pode ser verificado através das camadas com matizes claras presentes em todo o comprimento de ML-11. No entanto, considerando os teores encontrados na crosta continental superior, os teores de Rb e Sr não parecem ser suficientes para contribuir significativamente nos feldspatos.

Estudando a amostra ML-14 (Apêndices B10 e C2), é possível notar que a média de radiação gama natural é menor à média do grupo 2. Isso sugere que a amostra contém um conteúdo menor de elementos associados à radiação natural com respeito a outras amostras do grupo 2. Em relação ao coeficiente de variação, esta mostra um valor mínimo (<15%), o que implica que a maioria dos valores registrados estão ao redor da média. Analisando a curva de radiação, observa-se certo aumento que inicia na parte intermediária da amostra e, posteriormente, os valores se mantêm ao redor da média até a base. Também o gráfico mostra um padrão de serra em todo o comprimento da amostra, isto é, existem tantos picos como vales ao longo do eixo vertical, sem nenhuma anomalia a destacar. No tocante aos elementos associados, unicamente o K parece ter a contribuição mais relevante em relação às variações da curva de radiação. Isso é devido a que a curva de K apresenta certa semelhança com a curva de radiação gama. No entanto, é evidente que existem discrepâncias notáveis entre ambas as curvas, como os picos nas profundidades 718,63 m e 718,76 m na curva de K. Adicionalmente, graças à descrição macroscópica foi possível

determinar a presença de estratos de areia grossa a fina de cor marrom acinzentada escura a marrom acinzentada e de silte e argila cor preta, os quais estariam representados pelos picos e vales, respectivamente, encontrados ao longo da amostra. É preciso mencionar que nesta amostra a cor marrom parece estar associada principalmente à presença de manchas de óleo, principalmente no topo.

Em relação à susceptibilidade magnética, esta apresenta uma média inferior à média do grupo 2, indicando o conteúdo menor de elementos ferromagnéticos na amostra em comparação com o resto de amostras do grupo. Além disso, os valores registrados podem ser considerados pouco significativos variando apenas entre $1,6 \cdot 10^{-5}$ SI e $3,2 \cdot 10^{-5}$ SI. Observa-se um coeficiente de variação baixo, o que implica pouca variabilidade dos valores registrados. Analisando a curva, observa-se uma diminuição da susceptibilidade em direção à base. Isso sugere que há uma menor contribuição de elementos ferromagnéticos na base da amostra, o que pode ser ao fato de ter diversas fraturas nessa região. Apesar dos baixos valores de susceptibilidade registrados, as variações da curva parecem estar relacionados às contribuições de Fe.

No tocante aos teores da amostra e os encontrados na crosta continental superior, observa-se que, entre os elementos radioativos, o Th e o U exibem teores substancialmente superiores aos encontrados na crosta. Caso contrario é o teor de K, o qual é significativamente inferior ao valor típico da crosta, inclusive exibindo uma ordem de magnitude menor. Em relação aos elementos ferromagnéticos, tanto o Fe quanto o Ni apresentam valores menores aos típicos. Por último, dos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, unicamente o Ca exhibe um teor consideravelmente superior ao teor típico. Por sua parte, os teores de Rb, Sr e Ti são significativamente menores aos encontrados na crosta continental superior.

Em relação às micas, as curvas dos três elementos associados (Fe, K e Ti) exibem tendências semelhantes. No entanto, ao considerar os valores típicos da crosta continental superior, nenhum dos três elementos parece se destacar de maneira dominante em relação aos outros. Assim, a única concentração significativa identifica-se na camada superior, localizada a aproximadamente 718,63 m de profundidade. Essa concentração possivelmente representa o notável conjunto de sedimentos escuros na parte superior, os quais podem conter micas associadas aos três elementos.

Em relação aos feldspatos, as curvas dos elementos associados, Rb e Sr, exibem comportamentos similares. Como no caso anterior, os teores desses elementos são significativamente menores aos reportados na crosta pelo que o Rb e Sr não poderiam contribuir de forma significativa nos feldspatos.

Analisando os resultados da amostra ML-20 (Apêndices B11 e C2), nota-se que a média da radiação gama natural é menor à média do grupo 2, o que sugere que amostra exhibe um menor conteúdo de elementos radioativos em comparação ao resto de

amostras. Estudando o coeficiente de variação da radiação, este é mínimo, indicando pouca variabilidade nos valores registrados em relação à média. Ao detalhar a curva, observa-se um padrão de serra, isto é, há tantos picos como vales sem apresentar alguma anomalia característica nem tendência, o que é coerente com a baixa variabilidade dos dados. Em relação aos elementos associados, as curvas de K e Th parecem representar as contribuições desses elementos na curva de radiação gama. Entre 737,26 m e 737,32 m de profundidade parece haver certa semelhança tanto nas curvas de K e Th como a curva de radiação. A partir dos 737,32 m de profundidade até a base o comportamento da curva de radiação parece estar influenciado principalmente pela curva de Th.

Em relação à susceptibilidade magnética, esta apresenta uma média inferior à média do grupo 2, o que é um indicador de menores conteúdos de elementos ferromagnéticos na amostra ML-20. Ao analisar o coeficiente de variação, este é maior a 15 %, o qual o classifica como um coeficiente moderado e é interpretado como uma maior variabilidade dos dados adquiridos com respeito à média. Ao analisar a curva aprecia-se certa diminuição de topo a base, ao serem observados valores máximos no topo da amostra e posteriormente uma redução gradual até a base. Isso sugere que há um menor conteúdo de elementos de ferromagnéticos na base em relação ao topo da amostra. Estudando as curvas de Fe e Ni não possível observar semelhanças com a curva de susceptibilidade, o qual pode indicar que esse parâmetro físico está influenciado por outros fatores como a granulometria. De fato, ao comparar as curvas de radiação gama com a de susceptibilidade, identificam-se vários marcadores bem claros dessa relação entre a susceptibilidade e o tamanho de grão. Nas profundidades de 737,28 m, 737,32 m e 737,36 m notam-se comportamentos opostos entre a curva de susceptibilidade e a de radiação, isto é, enquanto na susceptibilidade há picos na de radiação há vales. Dessa forma, onde a radiação aumenta, a qual se relaciona com tamanho de grão fino, a susceptibilidade diminui. Da descrição macroscópica, a amostra ML-20 foi descrita como areia media menor a maior, em outras palavras, existe uma mudança na granulometria.

Comparando os teores dos elementos com os valores encontrados na crosta continental superior, foi encontrado que os teores de Th e U são superiores aos valores característicos da crosta. Por sua parte, o teor de K é consideravelmente inferior ao valor característico, inclusive estando em uma ordem de magnitude menor. Em relação aos elementos ferromagnéticos, o teor de Fe e Ni são significativamente inferiores aos valores encontrados na crosta. Com respeito aos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, os teores de Ca, Rb, Sr e Ti são substancialmente menores aos valores característicos e em todos os casos apresentando ordem de magnitude inferiores.

Em relação à presença de micas, é possível analisar as curvas de Fe, K e Ti. Em geral, as curvas de Fe e Ti exibem certa semelhança, ambas mostrando valores baixos exceto na profundidade de 737,32 m. Por sua parte, a curva de K exhibe dois aumentos de topo a

base. No entanto, ao considerar os teores dos elementos da crosta continental superior, os teores de Fe, K e Ti são significativamente inferiores. Isso sugere que possivelmente a amostra não exhibe conteúdos de mineral mica apreciáveis. Caso similar apresenta-se para os elementos associados aos feldspatos (Rb e Sr), os quais também tem valores significativamente menores aos encontrados na crosta, sugerindo poucos conteúdos de feldspatos na amostra ML-20.

No caso da amostra ML-21 (Apêndices B12 e C2), observa-se uma média de radiação gama natural inferior à média do grupo 2, o que indica o menor conteúdo de elementos radioativos na amostra em relação ao resto de amostras do grupo. Não é notado uma variabilidade significativa dos dados adquiridos, evidenciado pelo baixo coeficiente de variação. Em relação à curva, aprecia-se um primeiro aumento do topo à parte intermediária para posteriormente exibir valores ao redor da média até e culminar com um segundo aumento no fim da amostra. Isso indicaria certo aumento da radiação gama em direção à base, possivelmente associado a um maior conteúdo de elementos radioativos na base. A observação anterior pode ser verificada com a curva de Th, a qual parece explicar as variações na curva de radiação gama em todo o comprimento da amostra. Só na base da amostra parece haver uma contribuição tanto do Th quanto do K, devido aos aumentos visualizados em ambas as curvas.

Em relação à susceptibilidade magnética, aprecia-se uma média significativamente inferior à do grupo 2, inclusive sendo das menores registradas. Isso revelaria uma quantidade ínfima de elementos ferromagnéticos na amostra ML-21. Ao analisar a curva, observa-se uma diminuição de topo a base chegando a valores próximos a zero. Isso sugere que só em mínimas partes da amostra existem concentrações de elementos ferromagnéticos. Em relação a esses elementos, observa-se que o Ni poderia ser o elemento com maior influência nas variações da curva de susceptibilidade.

Comparando os teores dos elementos adquiridos com os da crosta continental superior, observa-se que dos elementos associados à radioatividade unicamente o Th exhibe um teor superior ao encontrado na crosta. Por sua parte, os teores de K e U mostram valores menores aos característicos da crosta, inclusive o primeiro encontra-se em duas ordens de magnitude inferiores. Em relação aos elementos ferromagnéticos, tanto o Fe quanto o Ni exibem teores menores aos encontrados na crosta continental, o que é coerente com a observação anterior sobre o baixo conteúdo de elementos ferromagnéticos representado pela curva de susceptibilidade magnética. Analisando os teores dos elementos associados ao armazenamento de CO₂, todos são substancialmente inferiores aos valores típicos da crosta. Especialmente, observa-se que os teores de Rb, Sr e Ti estão em ordem de magnitudes inferiores aos valores típicos.

Estudando o conteúdo de micas, observa-se que as curvas dos três elementos associados, Fe, K e Ti, são relativamente similares, mostrando valores máximos no topo

e na base da amostra. No entanto, ao considerar os teores de elementos encontrados na crosta continental superior, observa-se que só o Fe apresenta um teor na mesma ordem de magnitude, porém menor ao da crosta. Isso sugere há presença de micas associadas a Fe tanto no topo como na base da amostra, porém em concentrações bem limitadas. No caso dos feldspatos, as curvas de Rb e Sr não apresentam semelhança. Além disso, ambos os elementos têm teores consideravelmente menores aos encontrados na crosta, sugerindo conteúdos ínfimos de feldspatos. Isso pode ser verificado com a imagem RGB e a descrição macroscópica, a qual que descreve a amostra com cor marrom muito escura sem mostra de cores claras aparentes.

No tocante à amostra ML-24 (Apêndices B13 e C2), a média de radiação gama natural está ao redor da média do grupo 2, porém, sendo inferior, o que sugere um menor conteúdo de elementos radioativos em relação ao resto de amostras. Estudando o coeficiente de variação, este é mínimo o que implica que os dados exibem pouca variabilidade ao redor da média. Estudando a curva, é possível observar um padrão de serra, isto é, picos e vales ao longo da extensão vertical. Além disso, aprecia-se certo aumento de topo a base, indicador de maior conteúdo de elementos radioativos na base com respeito ao topo. Ao analisar os elementos associados, nota-se que a curva de K apresenta certa semelhança com a curva de radiação, principalmente, na tendência crescente em direção à base. Além disso, considerando a descrição macroscópica da amostra, foram identificadas laminações de areia fina a muito fina, tonalidade amarela, cor marrom acinzentada escura e cor branca, o que é coerente com o padrão de serra visualizado na curva de radiação, sendo a areia de cor escura e a areia de cor clara representadas pelos picos e vales, respectivamente. Dessa forma, tanto o conteúdo de K como a granulometria aparentemente são fatores que determinam as variações da radiação gama natural.

Em relação à susceptibilidade magnética, os valores registrados podem ser considerados ínfimos, especialmente, ao serem comparados com a média do grupo 2. Isso sugere um conteúdo de elementos ferromagnéticos mínimo. Por outro lado, o coeficiente de variação mostra um valor considerável ($>30\%$), implicando alta variabilidade dos dados. No entanto, essa variabilidade está associada à presença de algumas medições distantes da média (*outliers*) como podem ser observados no gráfico. Estudando a curva, identifica-se um padrão de serra em toda extensão vertical, indicando constantes aumentos e diminuições de susceptibilidade. Adicionalmente, há uma tendência crescente em direção à base, sugerindo um maior conteúdo de elementos ferromagnéticos na base em relação ao topo da amostra. Isso pode ser verificado ao observar a curva de Fe que exibe certa tendência crescente em direção à base, especialmente na parte inferior notam-se altos valores de Fe. No entanto, considerando a descrição macroscópica, as diversas variações da curva podem ser associadas a mudanças no tamanho de grão, a areia fina representaria os picos e a muito fina os vales. Em qualquer caso, esses tamanhos de grão estariam associados a baixos valores de susceptibilidade magnética (LINDSLEY; ANDREASEN;

BALSLEY, 1966), como é verificado nos valores ínfimos registrados na amostra.

Comparando os teores dos elementos encontrados na amostra com aqueles da crosta continental superior, aprecia-se que o Th e o U exibem teores significativamente superiores aos encontrados na crosta. Por outro lado, o teor de K é menor ao valor característico da crosta, inclusive estado em uma ordem de magnitude menor. Em relação ao Fe e Ni ambos apresentam valores inferiores aos da crosta, especialmente o teor de Fe o qual está em uma ordem de magnitude inferior. No caso dos teores de Rb, Sr e Ti, todos são substancialmente inferiores aos valores típicos. Destaca-se o teor de Ca o qual, apesar de ser inferior, encontra-se em proximidade com o valor característico da crosta.

Em relação às micas, os três elementos associados (Fe, K e Ti) apenas representam menos do 25 % dos valores encontrados na crosta continental superior, o que sugere um baixo conteúdo de micas na amostra. Observando as curvas dos elementos associados, notam-se certas semelhanças, principalmente, entre o K e o Ti, os quais exibem um tendência crescente em direção à base. Isso pode ser interpretado como uma maior concentração de micas de forma gradual de topo a base. É preciso destacar a base das três curvas já que todas apresentam um aumento significativo, o que sugere uma contribuição dos três elementos nas micas localizadas na base da amostra.

Estudando os elementos associados aos feldspatos, as curvas de Rb e Sr expõem comportamentos similares, nos altos esses elementos teriam maiores contribuições na composição do feldspato. Isso pode ser verificado na imagem RGB, onde são identificadas estratos claros bem finos. Além disso, considerando os valores típicos da crosta continental, ambos os elementos na amostra exibem teores consideravelmente inferiores, o que seria indicador de uma baixa presença de feldspatos o que é coerente com as observações anteriores.

Estudando a amostra ML-29 (Apêndices B14 e C2), observa-se que a radiação gama natural apresenta uma média superior à do grupo 2, indicando um maior conteúdo de elementos radioativos na amostra em relação ao resto. Observando o coeficiente de variação, este é baixo o que implica pouca variabilidade dos dados. Analisando a curva, esta tem um padrão de serra que pode ser interpretado como diversos aumentos e diminuições das concentrações de elementos radioativos. Esse padrão encontra-se de forma mais pronunciada desde a parte intermediária à base. Em geral, nota-se certo aumento gradual de topo a base, sugerindo que há uma maior proporção de elementos radioativos na base com respeito ao topo. No entanto, ao analisar os curvas desses elementos observa-se que não existem semelhanças com a curva de radiação gama. Isto poderia ser explicado pela presença de minerais que contém outros tipos de elementos radioativos.

Destaca-se o mínimo valor da média de susceptibilidade magnética, sendo o menor valor de entre todas as amostras analisadas. Isso sugere um ínfimo conteúdo de elementos ferromagnéticos na amostra e uma presença escassa de elementos diamagnéticos

representados pelos valores negativos registrados, isto é, elementos que enfraquecem o campo magnético exercido sobre a amostra. Adicionalmente, ao comparar os teores desses elementos com os encontrados na crosta continental superior, observa-se que o Fe é substancialmente inferior ao valor característico da crosta. De forma similar, o teor de Ni representa menos do 50 % do valor característico. Dessa forma, confirma-se o baixo conteúdo de elementos ferromagnéticos na amostra ML-29.

Continuando com a análise de teores, dos elementos radioativos, os teores de Th e U são significativamente superiores aos valores típicos da crosta. Caso contrario, nota-se com o teor de K, o qual é significativamente menor ao valor típico. No tocante aos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, o teor de Ca destaca-se por seu alto valor, sendo consideravelmente superior ao valor encontrado na crosta. Por sua parte, os teores de Rb, Sr e Ti são inferiores aos da crosta continental.

Em relação ao conteúdo de micas, é preciso considerar a comparação anterior com respeito aos valores típicos da crosta, já que os três elementos associados ao mineral (Fe, K e Ti) são significativamente inferiores aos valores da crosta. Isto poderia indicar que baixas concentrações de mica na rocha. No entanto, observa-se que os elementos associados apresentam algumas similitudes, principalmente, no topo, o que possivelmente representa o estrato escuro encontrado a 760,65 m de profundidade e que pode estar relacionado ao mineral mica.

Estudando os elementos associados aos feldspatos, nota-se que as curvas de Rb e o Sr apresentam comportamentos similares, indicando presença de feldspatos ao longo da amostra. No entanto, novamente os teores desses elementos são inferiores aos valores típicos da crosta. Isso sugere que a amostra pode ter presença do mineral feldspato inferior à média de rochas sedimentares.

No tocante à amostra ML-30A (Apêndices B15 e C2), esta apresenta uma média de radiação gama natural superior à média do grupo 2, sugerindo um maior conteúdo de elementos radioativos na rocha em relação ao resto de amostras. Observa-se um coeficiente de variação mínimo, indicando pouca variabilidade dos valores entorno da média. Analisando a curva, identifica-se certa tendência crescente em direção à base, o que estaria associado a um aumento do conteúdo de elementos radioativos até a base. Em relação aos elementos radioativos, unicamente o K parece ter certa influência nas variações da curva de radiação gama, devido a seu comportamento relativamente similar de crescimento em direção à base.

A média da susceptibilidade magnética da amostra ML-30A é menor à média registrada do grupo 2, inclusive mostrando um valor ínfimo para o máximo registrado e sendo dos menores valores registrados no grupo. Isso sugere que há um mínimo conteúdo de elementos ferromagnéticos presentes na amostra. Tais elementos, Fe e Ni, ao serem comparados com os valores encontrados na crosta continental, representam menos de 14

% e 26 % dos valores típicos da crosta, respectivamente. Dessa forma, seriam esperados baixos registros de susceptibilidade magnética na amostra.

Em relação aos elementos radioativos e os elementos típicos da crosta continental superior, nota-se o Th e o U exibem teores significativamente superiores aos encontrados na crosta. No entanto, para o caso do U, o coeficiente de variação é consideravelmente alto, o que indica registros anômalos desse elemento, como é observado na curva. Em relação aos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, o teor de Ca é consideravelmente superior ao valor típico da crosta, Por sua parte, os teores de Rb, Sr e Ti são significativamente inferiores aos valores típicos.

Estudando os elementos associados às micas (Fe, K e Ti) e considerando a comparação com os valores da crosta, os valores significativamente inferiores indicariam baixas concentrações de mica associada a esses três elementos na amostra ML-30A. No entanto, é possível identificar que as curvas dos três elementos associados são relativamente similares, ressaltando um aumento entre a profundidade de 761,405 m e 761,415 m, o que verifica-se por alguns estratos escuros nessa mesma faixa de profundidade na imagem RGB. Em relação aos elementos associados aos feldspatos, encontram-se certas semelhanças nas curvas de Rb e Sr. No entanto, devido a seus teores consideravelmente inferiores aos valores característicos da crosta, esperam-se baixas concentrações de feldspato associados a esses elementos na amostra.

As anteriores observações são coerentes com a descrição macroscópica da amostra, a qual descreve laminações de areia media a fina de cores claras e poucos cores escuras, sugerindo uma composição principalmente quartzosa com cimento conformado por Ca o que gera os cores claros na amostra.

No que se refere à amostra ML-30B (Apêndices B16 e C2), a média radiação gama natural encontram-se em cima da média do grupo 2, sugerindo maior conteúdo de elementos radioativos em comparação a outras amostras do grupo. Em relação ao coeficiente de variação, este é mínimo o que indica pouca variabilidade dos valores registrado em torno da média. Estudando a curva de radiação gama, observa-se uma padrão de serra, indicador de aumentos e diminuições constantes, com tendência decrescente em direção à base, sugerindo um diminuição dos elementos radioativos nessa direção. Essa tendência é similar à observada na curva de K, o que indicaria que as variações de radioatividade da amostra estariam relacionadas principalmente ao conteúdo de K.

Em relação à susceptibilidade magnética, a média é superior à média do grupo 2, o que indicaria um maior conteúdo de elementos ferromagnéticos com respeito ao resto de amostras. Observa-se um coeficiente de variação moderado (>15 %) o que está associado a uma maior dispersão dos dados em relação à média. Analisando a curva, nota-se um padrão de serra com duas tendências. A primeira tendência relativamente crescente desde parte superior até a parte intermediária, aproximadamente até 762,61 m de profundidade.

No entanto, esse crescimento é mínimo com registros praticamente mantendo os mesmos valores. A segunda tendência é decrescente desde a parte intermediária até a base. Dessa forma, interpreta-se que o conteúdo de elementos ferromagnéticos diminui gradualmente de topo a base. Observa-se que a curva de Fe apresenta uma tendência similar de primeiro crescimento e posterior diminuição, o que sugere que a tendência geral da curva de susceptibilidade estaria associada ao conteúdo de Fe presente na amostra.

Comparando os teores registrados com aqueles encontrados na crosta continental superior, é possível observar que o teor de K representa menos do 36 % do valor típico da crosta. Caso contrário apresentam os teores de Th e U, os quais são significativamente superiores aos encontrados na crosta. No caso dos elementos ferromagnéticos, os teores de Fe e Ni são menores aos valores típicos da crosta. Finalmente, dos elementos de interesse para o armazenamento de CO₂, o Ca exibe um teor consideravelmente superior ao valor típico. Por outra parte, os teores de Rb, Sr e Ti são inferiores aos valores característicos da crosta continental.

Em relação às micas, as curvas de Fe, K e Ti são razoavelmente similares, possivelmente indicando maiores concentrações de mica na parte intermediária da amostra. No entanto, devido a que os teores desses elementos são inferiores aos encontrados na crosta continental, espera-se um conteúdo de mineral mica consideravelmente menor aos encontrados nas rochas sedimentares da crosta. No tocante aos feldspatos, as curvas de Rb e Sr apresentam praticamente as mesmas variações, sugerindo uma distribuição quase homogênea de feldspatos ao longo da amostra. Além disso, considerando os valores típicos da crosta continental, o teor de Rb parece ser o elemento que apresenta maior influência nos feldspatos ao representar o 60 % do valor típico da crosta em relação ao 35 % que representa o Sr.

Em relação à amostra ML-87 (Apêndices B17 e C2), observa-se que a média de radiação gama natural é superior à média do grupo 2, sugerindo um maior conteúdo de elementos radioativos em comparação com o resto de amostras. Também, nota-se um baixo coeficiente de variação, indicando pouca variabilidade dos dados ao redor da média. Estudando a curva de radiação, esta exibe um padrão tipo serra com diversos picos e vales, indicando constantes aumentos e diminuições de radiação. Nota-se certo aumento até 836,38 m de profundidade, a partir de onde a curva se mantém relativamente ao redor dos mesmos valores até 836,44 m de profundidade, onde finalmente diminui novamente até a base da amostra. No entanto, não foram observados correlações entre a curva de radiação gama e as de elementos radioativos. Por outro lado, ao observar a imagem RGB, aprecia-se que as camadas mais escuras encontram-se na parte intermediária da amostra, enquanto as camadas mais claras estão nos extremos da mesma, indicando que possivelmente a curva de radiação este ligada à presença de granulação mais fina ou minerais de tonalidade escura associados a outros elementos radioativos na parte intermediária da amostra com

menor presença no topo e base da amostra.

No tocante à susceptibilidade magnética, esta é baixa, porém superior à média do grupo 2, o que sugere maior quantidade de elementos ferromagnéticos na amostra ML-87 que em outras amostras. Em relação à curva, nota-se diversos aumentos e diminuições da mesma indicando variações de elementos ferromagnéticos ao longo da amostra. Também, é possível notar três regiões na curva. Um aumento desde o topo até 836,36 m de profundidade, posteriormente, os valores se mantêm relativamente similares até 836,44 m de profundidade, a partir de onde começa uma diminuição da curva até a base. Isso é coerente com o observado na curva de Fe, o que poderia indicar que há maior quantidade de elementos ferromagnéticos na parte intermediária da amostra.

Realizando a comparação dos teores com os valores característicos da crosta continental superior, aprecia-se que o teor de K exibe um valor consideravelmente inferior ao valor característico da crosta, estando inclusive em uma ordem de magnitude menor. Caso contrário observa-se para os teores de Th e U, os quais são significativamente superiores aos encontrados na crosta. No tocante aos elementos ferromagnéticos, o teor de Fe é substancialmente inferior, estando em ordem de magnitude menor. De forma similar, o teor de Ni também é inferior ao valor característico da crosta, porém mantendo a mesma ordem de magnitude. Estudando os elementos de interesse para a estocagem de CO₂, o teor de Ca é consideravelmente superior ao valor registrado na crosta. No caso do Rb, Sr e Ti, estes elementos mostram teores significativamente inferiores aos encontrados na crosta.

Em relação às micas, observam-se semelhanças entre as curvas de K e Ti. No entanto, a curva de Fe apresenta um comportamento coerente com o observado na imagem RGB, o que poderia indicar que há maior quantidade de mineral mica associada a Fe na parte intermediária do que nos extremos da amostra. No caso dos feldspatos, aprecia-se que as curvas de Rb e Sr são similares, indicando três regiões com valores constantes no topo, na parte intermediária e na base da amostra, o que parece coerente com o observado na imagem RGB, na qual observam-se as camadas mais claras nos extremos com alguns fragmentos claros na parte intermediária da amostra.

É possível sintetizar as comparações descritas anteriormente para o Grupo 2 na Tabela 17, a seguir.

Tabela 17 – Médias de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética e teores de elementos químicos de amostras do Grupo 2. Os valores em negrito representam valores superiores à média do dado de referência.

Dado	Amostra ML	Média	11	14	20	21	24	29	30A	30B	87
Ref.	Prof. (m)		713,0	718,4	736,8	738,1	747,6	759,7	760,3	761,4	835,0
G2	N.G. (cps)	85,53	84,28	84,52	83,92	83,38	85,04	87,57	88,01	86,91	87,71
	M.S. (10^{-5} SI)	1,31	1,42	2,59	1,02	0,36	0,51	-0,02	0,29	1,9	1,64
Crosta Sup.	K (ppm)	28000,0	2783,73	4589,71	3160,56	418,95	6071,24	6032,48	4509,34	10154,47	5052,24
	Th (ppm)	10,7	25,76	35,93	27,39	18,26	30,46	81,33	101,2	54,83	40,63
	U (ppm)	2,8	16,5	18,38	8,93	1,87	14,62	24,22	17,65	27,95	16,79
	Fe (ppm)	35000,0	13428,16	17207,4	10689,74	12614,55	8488,75	3892,05	4786,74	12298,25	3590,03
	Ni (ppm)	44,0	17,2	16,1	13,2	18,06	15,25	20,61	11,53	29,34	22,31
	Ca (ppm)	30000,0	50193,52	75956,11	2419,34	12918,66	23798,34	52923,18	70246,22	77006,43	118750,37
	Rb (ppm)	112,0	12,42	19,37	15,75	2,48	24,91	35,68	37,18	66,84	49,1
	Sr (ppm)	350,0	39,02	48,97	24,81	27,39	44,16	136,9	143,74	121,31	89,41
	Ti (ppm)	4100,0	581,04	1000,15	850,54	212,76	1041,77	1342,84	1229,01	1515,43	549,71

4.6 Resultados das análises de amostras selecionadas do testemunho ML-1 com o equipamento de DRX

Das 16 amostras analisadas do testemunho ML-1, quatro difratogramas de raios X podem ser visualizados nas Figs. 32 - 36 e os minerais identificados são listados na Tabela 18. As reflexões de alta intensidade implicam abundância de um mineral específico, enquanto as reflexões com menor intensidade implicam uma quantidade limitada de um mineral específico na amostra.

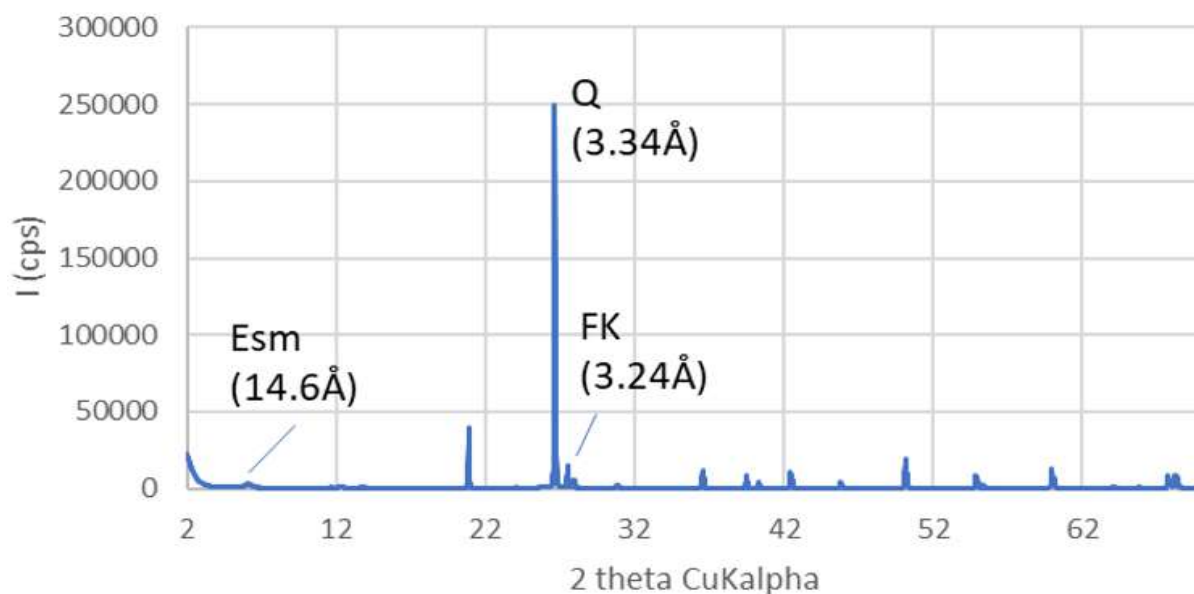


Figura 32 – Difratograma de raios X da amostra ML-11 localizada a 713 m de profundidade.

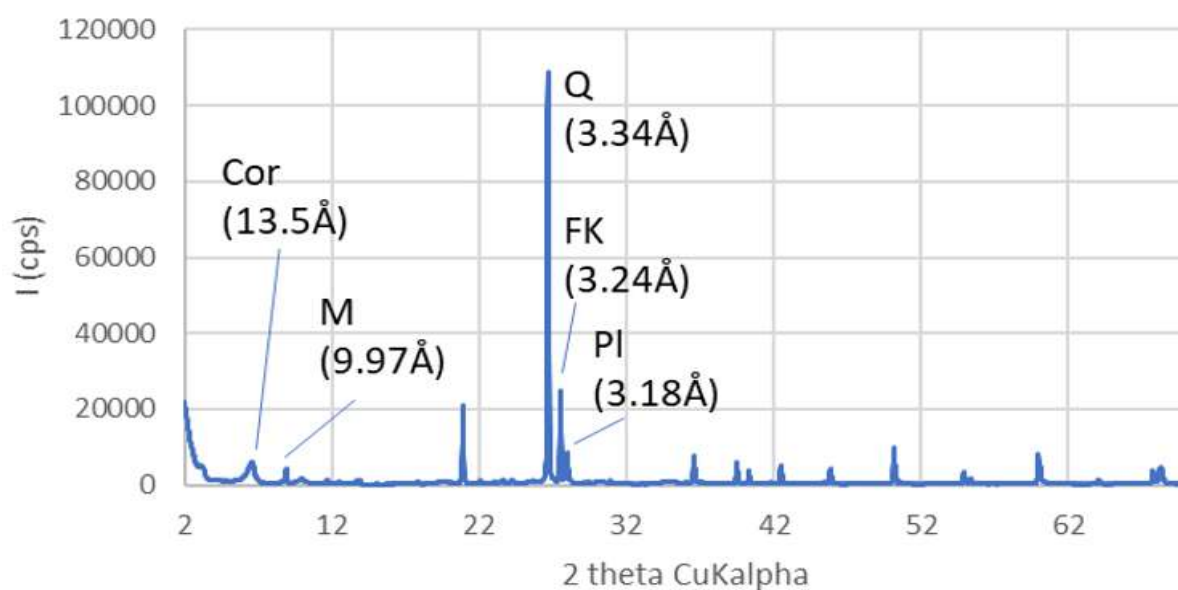


Figura 33 – Difratograma de raios X da amostra ML-14 localizada a 718,4 m de profundidade.

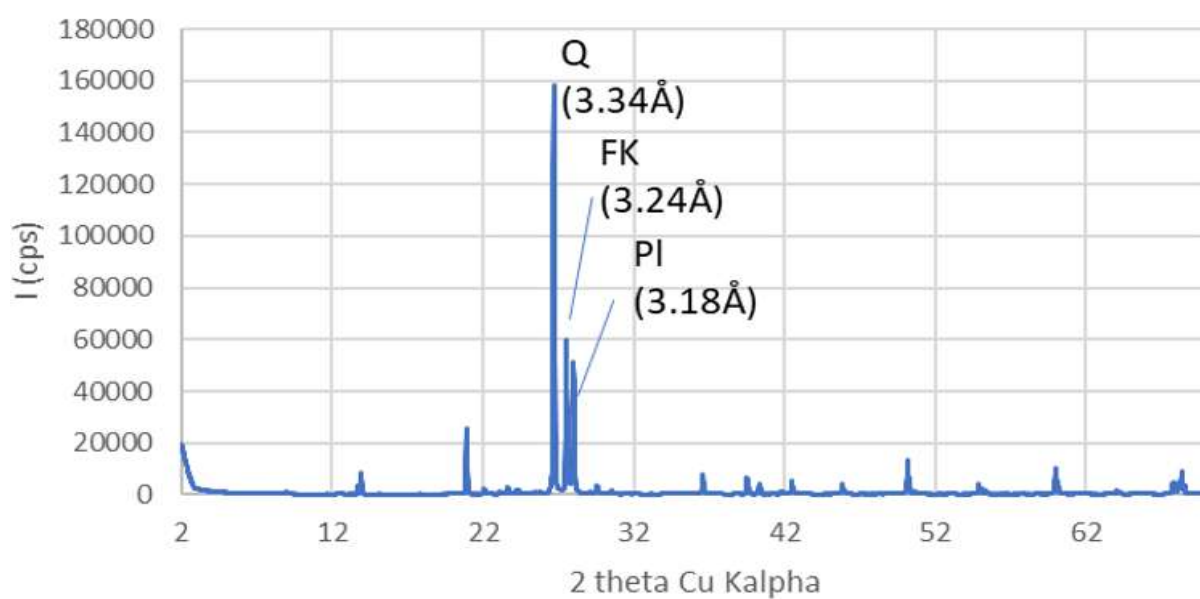


Figura 34 – Difratoograma de raios X da amostra ML-87A localizada a 835,0 m de profundidade.

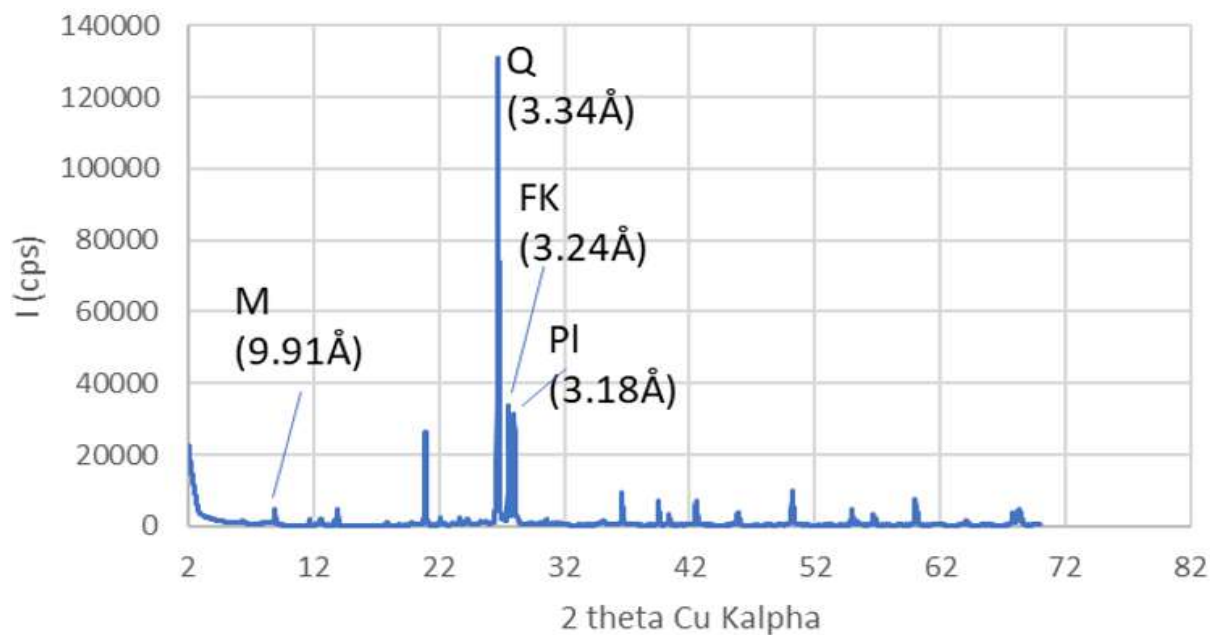


Figura 35 – Difratoograma de raios X da amostra ML-87B localizada a 835,0 m de profundidade.

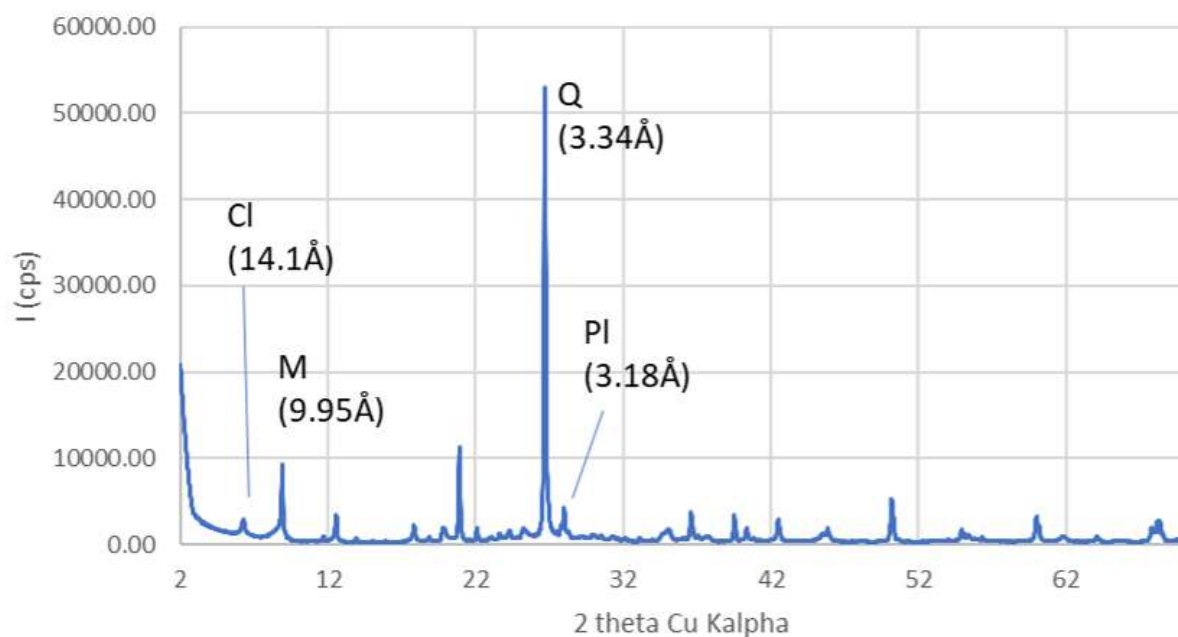


Figura 36 – Difratoograma de raios X da amostra ML-70 localizada a 1190,6 m de profundidade.

Tabela 18 – Minerais identificados nos difratogramas de raios X das amostras do testemunho Mallorquín N° 1.

Amostra ML	Qtz	Kfs	Pl	Chl	Mca	Esm	Crr	HT	Anl
70	X		x	x	x			x	
69	X		x	x	X			x	
72	X		X	x	x				
71	X		X	x	X				
73	X		x	x	x				
74	X		x	x	x				
87A	X	X	X					x	
87B	X	X	X	x	x			x	
11	X	x	x			X		x	
14	X	X	x		x		X	x	
20	X		x				X		
21	X				x		X		
24	X	x	x				x		
29	X		x	x	x				X
30A	X		x	x	x				X
30B	X	x	x	x	x		x	x	x

Legenda: Qtz - Quartzo, Kfs - feldspato potássico, Pl - feldspato plagioclásio, Chl - clorita, Mca - mica, Esm - esmectita, Crr - corrensite, HT - hidrotalcita, Anl - Analcima. X – mineral com reflexão principal com elevada intensidade, x - mineral com reflexão principal com baixa intensidade.

Quartzo é o único mineral que está presente em todas as amostras e exibe com reflexão principal ($d = 3.34\text{\AA}$) com elevada intensidade, o que sugere abundância na amostra.

Feldspato plagioclásio está presente na maioria das amostras com reflexão principal ($d = 3.18\text{\AA}$) com intensidades elevadas ou baixas, sugerindo quantidades variáveis.

Feldspato potássico, provavelmente microclínio ($d = 3.24\text{\AA}$), ocorre em poucas amostras e, da mesma forma que o plagioclásio, possui intensidades elevadas e baixas.

Os filossilicatos identificados compreendem mica ($d = 10\text{\AA}$), clorita (valores de d iguais a 14\AA , 4.72\AA e 3.53\AA), esmectita ($d = 14.8\text{\AA}$), e corrensitita (valores de d iguais a 29\AA e 13.5\AA). As intensidades são variáveis (elevada e baixa), o que deve corresponder a quantidades variáveis desses minerais nas amostras analisadas.

Hidrotalcita ($d = 7.5\text{\AA}$) e analcima ($d = 3.42\text{\AA}$) foram identificadas em poucas amostras.

4.7 Seleção de camadas potenciais para o armazenamento de CO₂ nas formações Rio Bonito e San Miguel

É possível realizar uma seleção das camadas com as melhores características para a estocagem de CO₂ tanto para o Brasil como para o Paraguai. A seleção encontra-se a seguir.

Tabela 19 – Melhores camadas selecionadas para o armazenamento de CO₂ no Brasil.

Testemunho	Dist. Parque (km)	Camada	Topo (m)	Base (m)	Esp. (m)	VSh (%)	Por. (%)
2-AA-1-SP	49,94	A	1866	1873	7	6,439	21,32
2-AA-1-SP	49,94	C	1895	1900	5	10,544	19,17
2-AA-1-SP	49,94	B	1875	1882	7	8,032	13,51
2-AR-1-SP	12,62	A	1907	1915	8	7,227	13,48

Tabela 20 – Melhores camadas selecionadas para o armazenamento de CO₂ no Paraguai.

Testemunho	Dist. Parque (km)	Camada	Topo (m)	Base (m)	Esp. (m)	VSh (%)	Por. (%)
IG-2	320,4	C	844	871	27	12,623	21,69
IG-2	320,4	D	871	883	12	<1	13,84

DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Ao analisar as camadas de arenito identificadas como as mais promissoras para o armazenamento de CO₂ no Brasil (Tabela 19), observa-se que as quatro principais foram atingidas exclusivamente por poços perfurados no estado de SP. Embora no PR tenham sido identificadas camadas com maior espessura (Tabelas 7 - 12), estas não exibem combinações mais favoráveis de conteúdo de argila e porosidade em comparação com as quatro melhores camadas. Além disso, é importante destacar que três das quatro camadas principais foram encontradas nas amostras da região de Amadeu Amaral (SP), o que sugere que em testemunhos próximos a essa região poderiam se encontrar as camadas mais apropriadas para o armazenamento de CO₂. Nesse contexto, a camada A do testemunho 2-AA-1-SP (Fig. 28) se destaca como a candidata mais adequada para o armazenamento de CO₂ no Brasil, devido à sua combinação de baixo conteúdo de argila (<15 %) e alta porosidade (> 20 %). Destaca-se a camada A do testemunho 2-AR-1-SP (Araçatuba, SP) devido à sua proximidade com um parque de biocombustíveis da Raizen, o que poderia resultar em significativa redução dos custos de infraestrutura e transporte de CO₂ em comparação com as outras opções.

No caso do Paraguai, unicamente o testemunho IG-2 apresenta camadas apropriadas para o armazenamento de CO₂ (Tabela 20). A camada C do poço IG-2 (Fig. 31) destaca-se como a candidata com maior potencial devido a exibir a melhor combinação de alta porosidade (> 20 %), baixo conteúdo de argila (<15 %) e espessura considerável (mais de quatro vezes do mínimo requerido). No entanto, é preciso enfatizar que esta análise está limitada à disponibilidade de curvas de perfilagem geofísica para certas profundidades dos testemunhos paraguaios. Dessa forma, não foram analisadas camadas mais profundas que poderiam ter características apropriadas para o armazenamento de CO₂. Por outro lado, também existem camadas mais rasas que poderiam ser utilizadas para a injeção de CO₂ em fases não supercríticas e que apresentam características apropriadas para o armazenamento como nas camadas do testemunho ML-1 (Tabela 15). Adicionalmente, os testemunhos no Paraguai encontram-se a menos de 5 km de distância uns de outros (Fig. 16), o que verifica que na região Doctor Juan León Mallorquín do Alto Paraná podem encontrar-se camadas apropriadas para a injeção de CO₂ tanto em fase supercrítica quanto

em outras fases.

Ao comparar as quatro camadas de maior potencial no Brasil com as do Paraguai, estas últimas apresentam espessuras maiores (Tabela 20). No que se refere ao conteúdo de argila, as camadas brasileiras exibem valores mais baixos. Em outro aspecto, as porosidades são similares para ambos os grupos de camadas. A maior discrepância é evidenciada nas profundidades, com as camadas do Paraguai localizadas em profundidades consideravelmente menores em comparação com as do Brasil. Isso torna as camadas do Paraguai candidatas apropriadas para o armazenamento de CO₂, uma vez que possuem espessuras adequadas, baixo conteúdo de argila, o que não comprometeria a porosidade significativamente, e porosidade classificada como moderada a alta, implicando uma maior capacidade de armazenamento de CO₂. Além disso, sua localização em profundidades menores poderia reduzir os custos de perfuração, transporte e injeção de CO₂ em fase supercrítica de forma considerável.

Por meio da análise das amostras ML-11 e ML-14 (Apêndice C), foi caracterizada a camada A do testemunho ML-1 (Fig. 31 e Tabela 20), revelando as seguintes implicações para a estocagem de CO₂. Ambas as amostras mostraram baixos teores de ferro, sugerindo uma presença limitada de óxidos de ferro que não ocupariam o espaço poroso na camada A e resultaria em um espaço maior disponível para a estocagem de CO₂. A análise por Difração de raios X (DRX) da amostra ML-11, representando uma parte mais superficial da camada A, revelou uma abundância de esmectita, um argilomineral que poderia restringir o espaço poroso e a capacidade de transmitir fluidos (permeabilidade). Além disso, foram detectadas certas quantidades de hidrotalcita, mineral que poderia contribuir em certa medida com a mineralização de CO₂ (SUESCUM-MORALES; JIMÉNEZ; FERNÁNDEZ-RODRIGUEZ, 2022). Também foram encontradas concentrações de feldspato potássico e plagioclase, minerais conhecidos por contribuir para a precipitação de carbonatos. Na parte inferior da camada A, representada pela amostra ML-14, observou-se uma abundância de feldspato potássico e menores quantidades de plagioclase e hidrotalcita, o que poderia permitir uma mineralização mais eficaz de CO₂ em comparação com a parte mais rasa da camada. Também foram identificadas quantidades de corrensita, um argilomineral que poderia restringir o espaço poroso e a permeabilidade dessa parte da camada. Embora a presença de esmectita possa limitar a capacidade de estocagem de CO₂ na camada A, a maioria dos fatores analisados favorece a mineralização eficaz deste fluido, especialmente na parte inferior da camada.

Considerando os projetos de internacionais de CCS/CCUS (VARGAS-GUZMÁN; SANT'ANNA, 2023), desde 2009 a indústria do etanol tem gerado um histórico de três projetos, *Farnsworth Unit*, *Bonanza BioEnergy* e *Illinois Industrial CCS*, todos localizados em terra e com distâncias fonte-reservatório entre 1,9 km e 160 km. Os principais reservatórios (Morrow "B" Superior, Morrow e *Mount Simon*) encontram-se

em bacias com baixa atividade tectônica, tipo *foreland* periférica e *sag* intracratônico, o que é similar para as formações Rio Bonito e San Miguel, ambas localizadas na Bacia do Paraná considerada intracratônica e com limitada atividade tectônica. Em relação às profundidades dos reservatórios, estas são superiores a 1.460 m, característica similar das camadas encontradas na Fm. Rio Bonito (Tabela 19).

No tocante às características geológicas, as formações Morrow "B" Superior, Morrow e *Mount Simon* são de idade Pensilvaniana e Cambriana, sendo mais antigas que as formações Rio Bonito e San Miguel. Os reservatórios de projetos de CCS/CCUS associados à indústria de etanol são considerados clásticos, principalmente conformados de arenito e litologias mais finas, associados a ambientes deposicionais diversos, desde continental até marinho. Características que são semelhantes para as formações Rio Bonito e San Miguel.

Ao comparar os parâmetros petrofísicos, observa-se que a espessura das camadas das formações Rio Bonito e San Miguel estão dentro da faixa de espessura dos reservatórios de projetos internacionais associados à indústria de etanol, entre 8,8 m e 610 m. De forma similar, as porosidades das camadas potenciais estão dentro da faixa de valores reportados em Morrow "B" Superior, Morrow e *Mount Simon*, entre 12,35 % e 20,50 %, inclusive sendo superior em média às porosidades do reservatório Morrow "B" Superior (13,50 %) e Morrow (12,35 %).

Dessa forma, as camadas com maior potencial para o armazenamento de CO₂ tanto no Brasil como no Paraguai exibem as mesmas características dos bem-sucedidos projetos internacionais de CCS/CCUS associados à indústria de etanol, os quais apresentam capacidades de captura entre 0.29 Mtpa e 5 Mtpa.

Outro aspecto a considerar são as rochas selantes e as trapas que impeçam o vazamento de CO₂. As numerosas camadas de siltitos e folhelhos, identificadas nas amostras dos testemunhos geológicos das formações Rio Bonito e San Miguel, têm o potencial de atuar como barreiras intraformacionais, eficazes na contenção do CO₂. Além disso, a análise de múltiplas amostras do testemunho ML-1 revelou a presença significativa de Ca o que asseguraria o processo de mineralização de CO₂ de forma efetiva em certas camadas de arenito da Fm. San Miguel. Por último, é preciso lembrar que a Fm. Palermo, sobreposta à Fm. Rio Bonito, seria considerada o selante regional, graças a sua litologia composta principalmente de siltitos e argilitos cinzas, com espessura média de 90 m, atingindo o máximo de 281 m, e com continuidade lateral em quase toda a Bacia do Paraná (LIMA, 2010; MILANI; ZALÁN, 1999; SCHNEIDER et al., 1974). A segunda formação que poderia atuar como selante é a Fm. Irati, que é composta principalmente por folhelho, siltito e calcário dolomítico, com espessura máxima de 71 m. Outras formações sobrejacentes são Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto, constituídas por argilito, folhelho e siltito; argilito e folhelho; e siltito e argilito, respectivamente. Em geral, todas as formações têm potencial para serem selantes adequados, principalmente devido ao seu alto teor de

argilominerais e espessuras consideráveis (SCHNEIDER et al., 1974). No caso da Fm. San Miguel, a Fm. Tacuary (equivalente estratigráfico à Fm. Irati) composta de siltito e argilito poderia funcionar como possível rocha selante (KOVACS, 1990).

Embora as diversas camadas de siltito e folhelho encontradas nas formações Rio Bonito e San Miguel possam representar potenciais selos para evitar o vazamento de CO₂, tal abundância também poderia limitar as capacidades de armazenamento das camadas de arenito ao gerar um processo de sobrepressão nas formações, como foi registrado no projeto Snøhvit na costa norte da Noruega (RINGROSE, 2018). Portanto, é fundamental realizar estudos aprofundados que investiguem a interação entre os siltitos/folhelhos e o CO₂ injetado nas formações geológicas.

CONCLUSÕES

Como conclusões dessa pesquisa é possível agrupar as observações da seguinte forma:

- A Fm. San Miguel está localizada a profundidades mais rasas que a Fm. Rio Bonito.
- A Fm. San Miguel apresenta maior espessura que a Fm. Rio Bonito. No caso da Fm. Rio Bonito, observou-se uma variação da espessura com uma tendência a ser maior no sentido SW.
- Em termos de litologias encontradas nas formações Rio Bonito e San Miguel, estas foram as esperadas, sendo arenitos e siltitos as litologias mais comuns.
- Tanto a Fm. Rio Bonito como a Fm. San Miguel apresentam tonalidades de cor similares: cinza, branca, marrom, vermelha e verde.
- Foram identificadas diversas camadas com características apropriadas para o armazenamento de CO₂ em ambas as formações Rio Bonito e San Miguel.
- As camadas da Fm. Rio Bonito com maior potencial para a estocagem de CO₂ encontraram-se na região de SP.
- Foram identificadas quatro camadas com o maior potencial para o armazenamento de CO₂ no Brasil, destacando-se a camada A do testemunho 2-AA-1-SP ao exibir alta porosidade e baixo conteúdo de argila.
- Os arenitos da Fm. San Miguel são mais espessos que os encontrados nos testemunhos da Fm. Rio Bonito o que é coerente com modelos de estudos anteriores que colocam o depocentro da Bacia do Paraná mais próximo à região leste do Paraguai.
- Identificaram-se duas camadas com as melhores características para a estocagem de CO₂ na Fm. San Miguel, ressaltando a camada C do testemunho IG-2 ao mostrar alta porosidade, baixo conteúdo de argila e espessura considerável.

- No testemunho ML-1 foram encontrados altos teores de Ca, Th e U e baixos teores de Fe, Ni e K, sugerindo que apesar da baixa porcentagem de Fe, o alto conteúdo de Ca poderia garantir a mineralização de CO₂ de forma efetiva.
- As camadas das formações Rio Bonito e San Miguel apresentam capacidades de armazenamento de CO₂ apropriadas, com destaque das camadas da Fm. San Miguel devido a estar localizadas em profundidades rasas e ter espessuras consideráveis.
- A localização das camadas da Fm. San Miguel a profundidades menores poderia reduzir os custos de perfuração, transporte e injeção de CO₂.
- Verificou-se que as camadas de arenito identificadas nas formações Rio Bonito e San Miguel compartilham características similares com as dos reservatórios utilizados em projetos internacionais de CCS/CCUS de sucesso associados à indústria de etanol.
- Nos testemunhos de ambas as formações observou-se siltitos e folhelhos sobrepostos aos arenitos, com potencial de reservatórios, que poderiam constituir possíveis selantes para garantir a captura de CO₂.

Referências

ABRAHAM-A, R. M. et al. Hydrocarbon indication in rio bonito formation sandstone: Implication for co2 storage in são paulo, brazil. *Energy Geoscience*, v. 5, n. 1, p. 100168, 2024. ISSN 2666-7592. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666759223000148>>.

ABRAHAM-A, R. M. et al. Assessment of co2 storage prospect based on physical properties of rio bonito formation rock units. *Energy Geoscience*, v. 5, n. 1, p. 100163, 2024. ISSN 2666-7592. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666759223000094>>.

Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis. *PROJETO REATE*. 2020. Disponível em: <<https://reate.cprm.gov.br/arquivos/index.php/s/z0XoautAuswCSbf?path=/>>.

AJAYI, T.; GOMES, J. S.; BERA, A. A review of CO2 storage in geological formations emphasizing modeling, monitoring and capacity estimation approaches. *Petroleum Science*, Elsevier BV, v. 16, n. 5, p. 1028–1063, 7 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12182-019-0340-8>>.

AL-SHARGABI, M. et al. Carbon Dioxide Applications for Enhanced Oil Recovery Assisted by Nanoparticles: Recent Developments. *ACS Omega*, American Chemical Society (ACS), v. 7, n. 12, p. 9984–9994, 3 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1021/acsomega.1c07123>>.

ANTONIASSI, J. *A difração de raios X com o método de Rietveld aplicada à bauxita de Porto Trombetas*. [S.l.]: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. 1 – 111 p.

BACHU, S.; GUNTER, W. D.; PERKINS, E. H. Aquifer disposal of co2: Hydrodynamic and mineral trapping. *Energy Conversion and Management*, Pergamon, v. 35, p. 269–279, 4 1994. ISSN 0196-8904.

BOCARDI, L. B. et al. Diagênese, contexto deposicional e história de soterramento da Formação Rio Bonito, Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 39, n. 3, p. 465–478, 9 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.2009393465478>>.

BRUNORO, R. S.; RODRIGUES, D. D.; SILVA, C. A. Caracterização das propriedades do reservatório utilizando curvas de perfilagem geofísica de poços no Campo de Namorado na Bacia de Campos-RJ. *13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, Brazilian Geophysical Society, p. 3, 8 2013.

CLARK, D.; EMERSON, D. Notes On Rock Magnetization Characteristics In Applied Geophysical Studies. *Exploration Geophysics*, Taylor Francis, v. 22, n. 3, p. 547–555, 9 1991. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/eg991547>>.

DEVELOPERS, G. *Susceptibility — GPG 0.0.1 documentation*. Disponível em: <https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/magnetics_susceptibility_duplicate.html>.

EIA. *Average Depth of Crude Oil and Natural Gas Wells*. 2020. Disponível em: <https://www.eia.gov/dnav/pet/pet_crd_weldep_s1_a.htm>.

FISCHER, H. et al. The role of southern ocean processes in orbital and millennial co2 variations – a synthesis. *Quaternary Science Reviews*, Pergamon, v. 29, p. 193–205, 1 2010. ISSN 0277-3791.

FULFARO, V. et al. Compartimentação e Evolução Tectônica da Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 12, n. 4, p. 590–611, 1982. Disponível em: <<https://ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/download/12194/11741>>.

Geotek Ltd. *Magnetic Susceptibility*. 2018. Disponível em: <<https://www.geotek.co.uk/sensors/magsusc/>>.

Geotek Ltd. *MULTI-SENSOR CORE LOGGING (MSCL)*. 2018. Disponível em: <https://www.geotek.co.uk/services/mscl_services/>.

Geotek Ltd. *Natural Gamma Spectrometry*. 2018. Disponível em: <<https://www.geotek.co.uk/sensors/natgam/>>.

Geotek Ltd. *STANDARD MULTI-SENSOR CORE LOGGER (MSCL-S)*. 2020. Disponível em: <<https://www.geotek.co.uk/products/mscl-s/>>.

Global CCS Institute. *Facility Data - Global CCS Institute*. 2020. Disponível em: <shorturl.at/uxJO5>.

Global CCS Institute. *Global Status of CCS 2021 CCS Accelerating to Net Zero*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/11/Global-Status-of-CCS-2021-Global-CCS-Institute-1121.pdf>>.

GOMES, C. B. et al. *Técnicas Analíticas Instrumentais Aplicadas à Geologia*. [S.l.]: Edgard Blucher/Pro-Minerio, 1984.

GUNTER, W. D.; PERKINS, E. H.; MCCANN, T. J. Aquifer disposal of co2-rich gases: Reaction design for added capacity. *Energy Conversion and Management*, Pergamon, v. 34, p. 941–948, 9 1993. ISSN 0196-8904.

HOLLOWAY, S.; SAVAGE, D. The potential for aquifer disposal of carbon dioxide in the UK. *Energy Conversion and Management*, Elsevier BV, v. 34, n. 9-11, p. 925–932, 9 1993. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90038-c](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8904(93)90038-c)>.

HOLZ, M. et al. A stratigraphic chart of the late carboniferous/permian succession of the eastern border of the paraná basin, brazil, south america. *Journal of South American Earth Sciences*, Pergamon, v. 29, p. 381–399, 3 2010. ISSN 0895-9811.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Carbon Dioxide Capture and Storage*. [S.l.], 2005. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/srccs_wholereport-1.pdf>.

- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Calentamiento global de 1,5 °C. Resumen para responsables de políticas*. [S.l.], 2018. 1-32 p.
- International Energy Agency. *Energy Technology Perspectives 2020*. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>>.
- International Energy Agency. *Bioenergy with Carbon Capture and Storage*. 2023. Disponível em: <<https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage#tracking>>.
- JENKINS, R.; SNYDER, R. L. *Introduction to X-ray Powder diffractometry*. [s.n.], 1996. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/9781118520994>>.
- KELEMEN, P. et al. An Overview of the Status and Challenges of CO₂ Storage in Minerals and Geological Formations. *Frontiers in Climate*, v. 1, 2019.
- KETZER, M. et al. *Atlas brasileiro de captura e armazenamento geológico de CO₂*. [S.l.]: EDIPUCRS, 2016. 95 p.
- KILLEEN, P.; MWENIFUMBO, C.; FORD, K. Tools and techniques: Radiometric methods. In: _____. [S.l.: s.n.], 2015. cap. 11, p. 447–524. ISBN 9780444538031.
- KOVACS, J. *Final Well Report Texaco Mallorquin N° 1 Alto Parana, Paraguay*. [S.l.], 1990.
- LARIONOV, V. Radiometry of boreholes. *Nedra, Moscow*, v. 127, 1969.
- LIMA, V. de. *Armazenamento geológico de CO₂ em aquíferos salinos : reatividade química em selos e rochas reservatório da bacia do Paraná*. 2010. 1-156 p. Disponível em: <<https://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/3169>>.
- LINDSLEY, D. H.; ANDREASEN, G. E.; BALSLEY, J. R. *SECTION 25: MAGNETIC PROPERTIES OF ROCKS AND MINERALS*. [s.n.], 1966. 543–552 p. Disponível em: <<https://doi.org/10.1130/mem97-p543>>.
- MAAHS, R. et al. Sequence stratigraphy of fluvial to shallow-marine deposits: The case of the early permian rio bonito formation, paraná basin, southernmost brazil. *Brazilian Journal of Geology*, v. 49, 2019. ISSN 2317-4692.
- MATTER, J. M. et al. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, v. 352, n. 6291, p. 1312–1314, 2016.
- MCLENNAN, S. M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, Wiley-Blackwell, v. 2, n. 4, p. n/a, 4 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/2000gc000109>>.
- MELLO, N. G. R. d.; ARTAXO, P. Evolução do Plano de Ação para Prevenção e Controle do Desmatamento na Amazônia Legal. *Revista do Instituto de Estudos Brasileiros*, Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), n. 66, p. 108, 4 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.11606/issn.2316-901x.v0i66p108-129>>.

- MENACHERRY, S. et al. Suitability of the Dryland Fluvial-Aeolian Sediments and its Depositional System for CO Sequestration, Analogues Study from 2 Western Lake Eyre Basin, Central Australia. In: . [s.n.], 2009. Disponível em: <https://www.searchanddiscovery.com/documents/2009/09010menacherry/ndx_menacherry.pdf>.
- MILANI, E. *Comentários sobre a origem e a evolução da Bacia do Paraná*. São Paulo, Brasil: Beca, 2004. 265–279 p. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/285077288_Comentarios_sobre_a_origem_e_a_evolucao_tectonica_da_Bacia_do_Parana_In_Mantesso-Neto_V_Bartorelli_a_Carneiro_CDR_Brito-Neves_BB_org_Geologia_do_Continente_Sul-Americano_Evolucao_da_Obra_de_Fernando_F>.
- MILANI, E.; FRANÇA, A.; MEDEIROS, R. Roteiros Geológicos: Rochas geradoras e rochas-reservatório da Bacia do Paraná, faixa oriental de afloramentos, Estado do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 15, n. 1, p. 135–162, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/284088050_Roteiros_Geologicos_Rochas_geradoras_e_rochasreservatorio_da_Bacia_do_Parana/citations>.
- MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. OROGENIAS PALEOZÓICAS NO DOMÍNIO SUL-OCIDENTAL DO GONDWANA E OS CICLOS DE SUBSIDÊNCIA DA BACIA DO PARANÁ. *Revista Brasileira de Geociências*, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 28, n. 4, p. 473–484, 12 1998. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.1998473484>>.
- MILANI, E. J.; ZALÁN, P. V. An outline of the geology and petroleum systems of the paleozoic interior basins of south america. *Episodes*, v. 22, p. 199–205, 9 1999. ISSN 0705-3797.
- Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. *NDC - a ambição climática do Brasil*. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>>.
- MORAES, O. *Caracterização Petrofísica e Petrográfica de Arenitos do Poço 1-PN-14-SC-02. Formação Rio Bonito – Bacia do Paraná*. 2017. 91 p. Disponível em: <http://www.geofisica.uff.br/sites/default/files/projetofinal/2017_olivia_de_moraes_franca.pdf>.
- Munsell Color Co., Inc. *Munsell Soil Color Charts: with Genuine Munsell Color Chips*. 2000.
- Observatório do Clima. *Mapa de Emissões / SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases*. 2020. Disponível em: <<https://plataforma.seeg.eco.br/map>>.
- OLABODE, A.; RADONJIC, M. Experimental Investigations of Caprock Integrity in CO2 Sequestration. *Energy Procedia*, Elsevier BV, v. 37, p. 5014–5025, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.415>>.
- OLIVEIRA, S. B. de et al. Geological screening for onshore co2 storage in the rio bonito formation, paraná basin, brazil. *Journal of Maps*, Taylor Francis, v. 19, n. 1, p. 2171817, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/17445647.2023.2171817>>.
- ORUÉ, D. *Síntese da geologia do Paraguai Oriental, com ênfase para o magmatismo alcalino associado*. [S.l.]: University of São Paulo, 1996.
- PACALA, S.; SOCOLOW, R. Stabilization wedges: Solving the climate problem for the next 50 years with current technologies. *Science*, v. 305, p. 968–972, 8 2004. ISSN 0036-8075.

- PEREZ-LOINAZE, V. et al. Palynology of the permian san miguel formation (western paraná basin, paraguay): Gondwanan biostratigraphic correlations. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 2010. ISSN 1695-6133. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50515686009>>.
- PIN. *How Far Do We Drill To Find Oil?* 2014. Disponível em: <<https://www.petro-online.com/news/fuel-for-thought/13/breaking-news/how-far-do-we-drill-to-find-oil/32357>>.
- RAIZEN. *Onde Estamos*. 2020. Disponível em: <<https://www.raizen.com.br/sobre-a-raizen/onde-estamos/enderecos>>.
- RINGROSE, P. S. The CCS hub in Norway: some insights from 22 years of saline aquifer storage. *Energy Procedia*, v. 146, p. 166–172, 2018.
- RITCHIE, H.; ROSER, M.; ROSADO, P. *CO2 and Greenhouse Gas Emissions*. 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>>.
- ROCKETT, G. et al. The carbmap project: Matching co2 sources and geological sinks in brazil using geographic information system. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 4, p. 2764–2771, 1 2011. ISSN 1876-6102.
- SANT'ANNA, L. et al. Origin and migration timing of hydrothermal fluids in sedimentary rocks of the paraná basin, south america. *Chemical Geology*, Elsevier, v. 230, p. 1–21, 6 2006. ISSN 0009-2541.
- SCHNEIDER, R. et al. Revisão estratigrafica da bacia do paraná. *Anais XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*, SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOLOGIA, Porto Alegre, br, v. 1, p. 24, 1974. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/09/410/9410911.pdf>.
- SILVA, A. L. da. *CARACTERIZAO MINERALÓGICA POR DIFRAO DE RAIOS X E DETERMINAO DE TERRAS RARAS POR ICP-MS DE ROCHAS DA REGIÃO SUL DA BAHIA*. 2013. 1-114 p. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-97XP2T/1/dissertacao_amanda.pdf>.
- SILVA, R. *Influência das propriedades petrofísicas na fragmentao de rochas graníticas por detonao com explosivos*. 2011. Disponível em: <<https://estudogeral.uc.pt/bitstream/10316/20152/1/Tese%20de%20Mestrado.pdf>>.
- SUESCUM-MORALES, D.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ-RODRIGUEZ, J. M. Review of the application of Hydrotalcite as CO2 sinks for climate change mitigation. *ChemEngineering*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 4, p. 50, 7 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/chemengineering6040050>>.
- Superintendência de Definio de Blocos. *Bacia do Paraná. Sumrio Geológico e Setores em Oferta*. [S.l.], 2017.
- TARLING, D.; HROUDA, F. *The magnetic Anisotropy of Rocks*. [S.l.]: Chapman & Hall, 1993.
- The University of Edinburgh. *Buracica Field EOR Project Details*. 2015. Disponível em: <<https://www.geos.ed.ac.uk/sccs/project-info/1745>>.

- THOMAS, H. et al. Enhanced Open Ocean Storage of CO₂ from Shelf Sea Pumping. *Science*, v. 304, n. 5673, p. 1005–1008, 5 2004. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.1095491>>.
- THORNBURG, J.; THOMAS, A.; JOHANSEN, S. *The San Miguel Formation: Mid Permian, Postglacial-Sedimentation in the Western Paraná Basin, Southeastern*. us, 1993.
- TOMIĆ, L. et al. Criteria for CO₂ storage in geological formations. *Podzemni radovi*, Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES), n. 32, p. 61–74, 2018.
- UCLA. *FAQ: What is the coefficient of variation?* 2022. Disponível em: <<https://stats.oarc.ucla.edu/other/mult-pkg/faq/general/faq-what-is-the-coefficient-of-variation/>>.
- United Nations Environment Programme. *COP26 ends with agreement but falls short on climate action*. 2021. Disponível em: <<https://www.unep.org/news-and-stories/story/cop26-ends-agreement-falls-short-climate-action>>.
- VARGAS-GUZMÁN, E.; SANT'ANNA, L. G. Integrated Assessment of Global Carbon Capture, Utilization, and Storage Projects. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.104031>>.
- VOORMEIJ, D.; SIMANDL, G. Geological, ocean, and mineral co₂ sequestration options: A technical review. *Geoscience Canada*, v. 31, p. 11–22, 2004.
- WELTJE, G. J.; TJALLINGII, R. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*, Elsevier BV, v. 274, n. 3-4, p. 423–438, 10 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.054>>.
- ZACHARIAS, A. *PREENCHIMENTO DE VALES INCISOS POR ASSOCIAÇÕES DE FÁCIES ESTUARINAS, FORMAÇÃO RIO BONITO, NORDESTE DO PARANÁ*. [S.l.]: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2004.
- ZALÁN, P. *The Paraná Basin, Brazil*. [S.l.]: AAPG, 1990. v. 51. 681-708 p.
- ZHANG, D.; SONG, J. Mechanisms for Geological Carbon Sequestration. *Procedia IUTAM*, Elsevier BV, v. 10, p. 319–327, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.piutam.2014.01.027>>.
- ZHAOFENG, X. et al. Economic evaluation of an IGCC cogeneration power plant with CCS for application in China. *Energy Procedia*, Elsevier BV, v. 4, p. 1933–1940, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.073>>.

Apêndices

Amostras selecionadas do testemunho Mallorquín N° 1

Tabela 21 – Análise macroscópica do grupo 1 de amostras analisadas com os equipamentos MSCL e DRX

N°	Comprimento (cm)	Profundidade (m)	Desc. Macroscópica usando as escalas de cores do Munsell
74	19,2	1151,2	Sd fL, Gley 1, 4/N, dk gry w/ hyd shw w/ sm lam Sd fU-fL, Gley 1, 8/10Y, lt gnsh gry
73	24,7	1152,1	Intbd lam Sd mL-fU, 5Y, 7/1, lt gry w/ Sd fL-vfU, 5Y, 2.5/1, blk
71	18,6	1163,5	lam hor w/ lam diag Sd fU-fL, 5Y, 6/1, gry w/ Sd fL, 5Y, 3/1, v dk gry
72	13,3	1164,5	Tp: intbd Sd fU-fL, 5Y, 5/1, gry - 5Y, 2.5/1, blk - Mid-Btm: Sd mL-fU, 5Y, 5/1, gry
69	29,0	1189,9	Tp: intbd Sd fL-vfU, Gley 1, 3/N, v dk gry w/ Sd fL-vfU, Gley 1, 5/10Y, gnsh gry - Mid-Btm: Sd fL-vfU, Gley 1, 3/N, v dk gry
70	15,9	1190,6	Tp: Sd vfU, Gley 1, 2.5/N, blk - Mid: Sd fU-fL, Gley 1, 4/N, dk gry - Btm: Sd vfU, Gley 1, 2.5/N, blk

Tabela 22 – Análise macroscópica do grupo 2 de amostras analisadas com os equipamentos MSCL e DRX

N°	Comprimento (cm)	Profundidade (m)	Desc. Macroscópica usando as escalas de cores do Munsell
11	16,0	713,0	Sd mU-mL, 2.5Y, 7/2, lt gry, w/ lam: Sd fU, 10YR, 4/2, dk grysh bn
14	24,1	718,4	Sd cL-fU, 2.5Y, 4/2, dk grysh bn - 2.5Y, 5/2, grysh bn w/ sm Slt-Cl lam, 2.5Y, 2.5/1, blk
20	18,0	736,8	Sd, mL-mU, 2.5Y, 4/2, dk, grysh bn - 3,1, v dk gry
21	6,4	738,1	Sd, mL-mU, 7.5Y, 2.5/2, v dk brn
24	22,2	747,6	lam Sd fL-vfU, 2.5Y, 8/1, wh - 4/2, dk grysh bn
29	12,3	759,7	Sd mL, 7.5YR, 4/2, bn, w/ lam Sd fU, 2.5Y, 8/1, wh, w/ Slt, 2.5Y, 3/1, v dk gry
30A	7,5	760,3	lam: Sd, mL-fU, 10YR, 7/1, lt gry and 6/1, gry w/ some Sd, fU, 2.5Y, 2.5/1, blk
30B	18,6	761,4	Sd fL-fU, 2.5Y, 2.5/1, blk
87	16,1	835,0	Sd fL-vfU, 5Y, 7/1, lt gry - 5Y, 2.5/1, blk

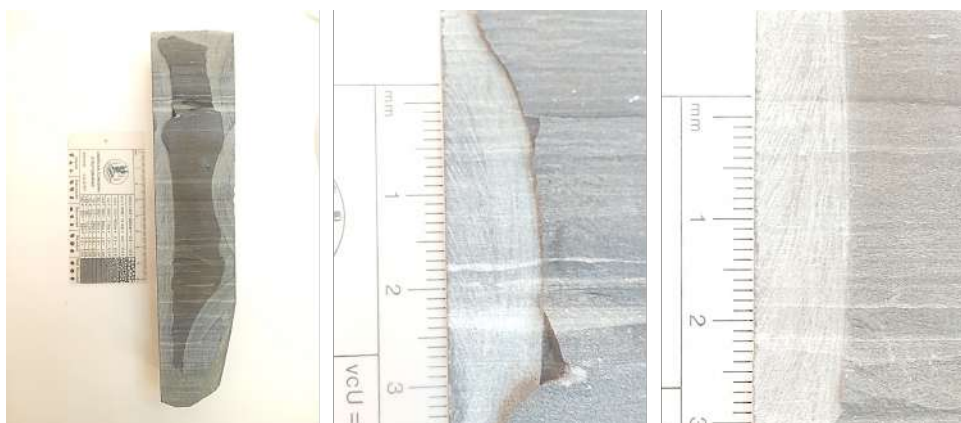


Figura A1 – Amostra N° 74 localizada a 1151,2 m

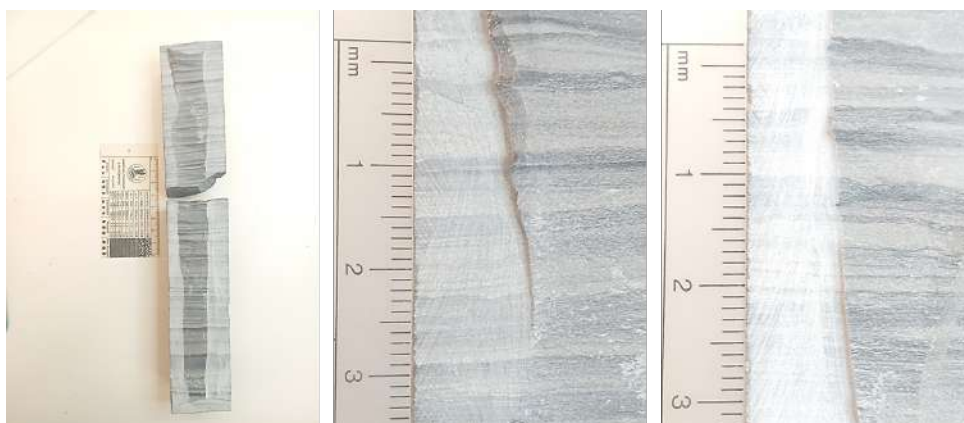


Figura A2 – Amostra N° 73 localizada a 1152,1 m.

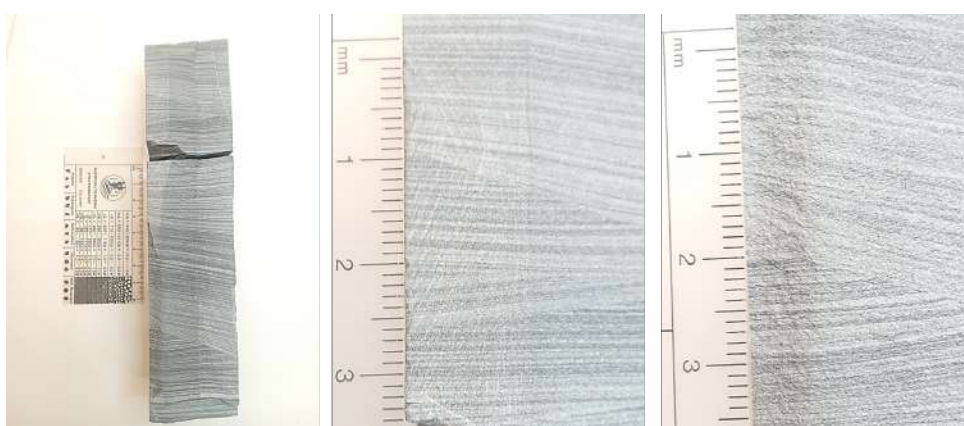


Figura A3 – Amostra N° 71 localizada a 1163,5 m.



Figura A4 – Amostra N° 72 localizada a 1164,5 m.

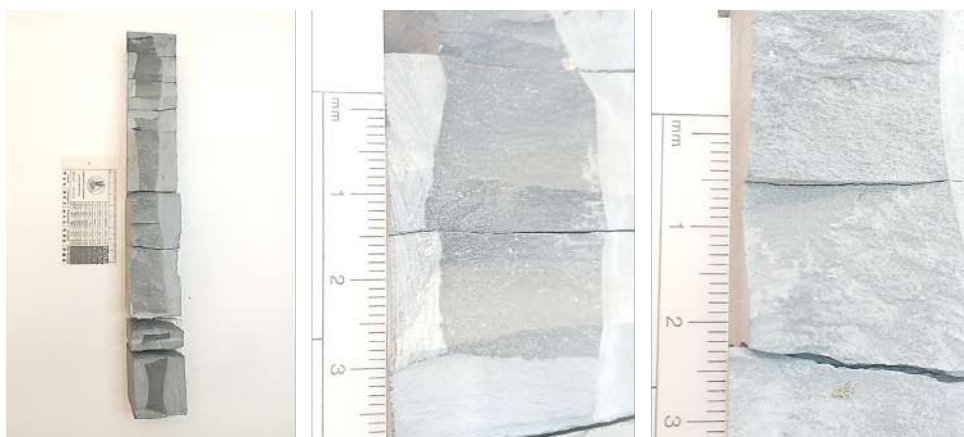


Figura A5 – Amostra N° 69 localizada a 1189,9 m.

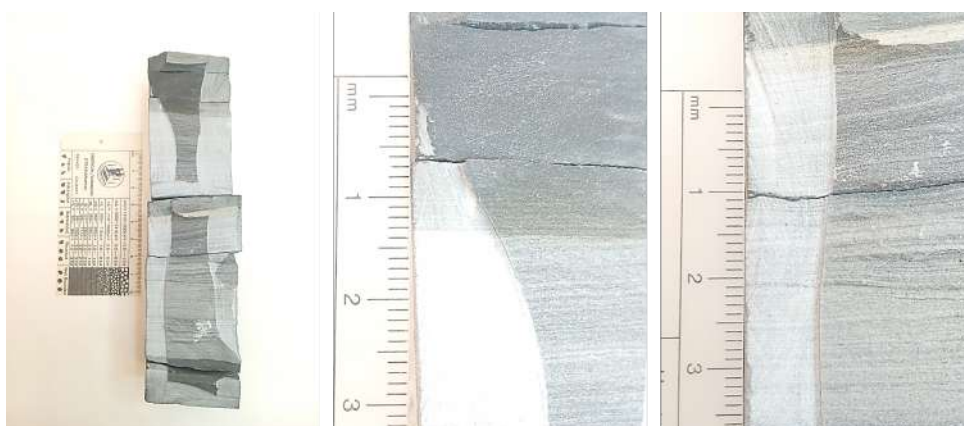


Figura A6 – Amostra N° 70 localizada a 1190,6 m.



Figura A7 – Amostra N° 11 localizada a 1190,6 m.

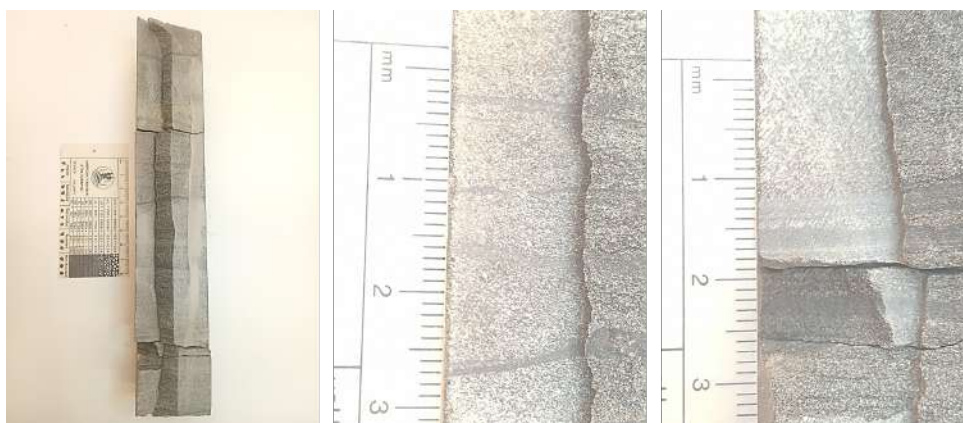


Figura A8 – Amostra N° 14 localizada a 718,4 m.



Figura A9 – Amostra N° 20 localizada a 736,8 m.



Figura A10 – Amostra N° 21 localizada a 738,1 m.



Figura A11 – Amostra N° 24 localizada a 747,6 m.



Figura A12 – Amostra N° 29 localizada a 759,7 m.

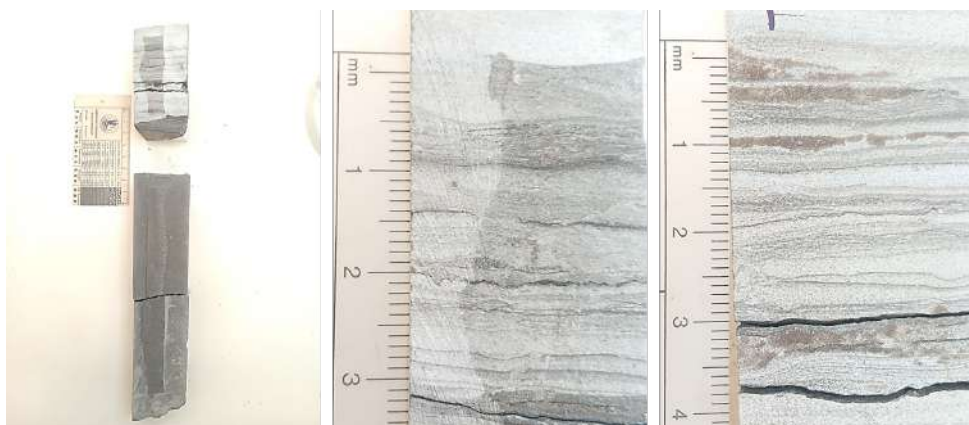


Figura A13 – Amostra N° 30A localizada a 760,3 m.



Figura A14 – Amostra N° 30B localizada a 761,4 m.



Figura A15 – Amostra N° 87 localizada a 835,0 m.

Curvas e imagens RGB das amostras selecionadas do testemunho ML-1 usando equipamento MSCL

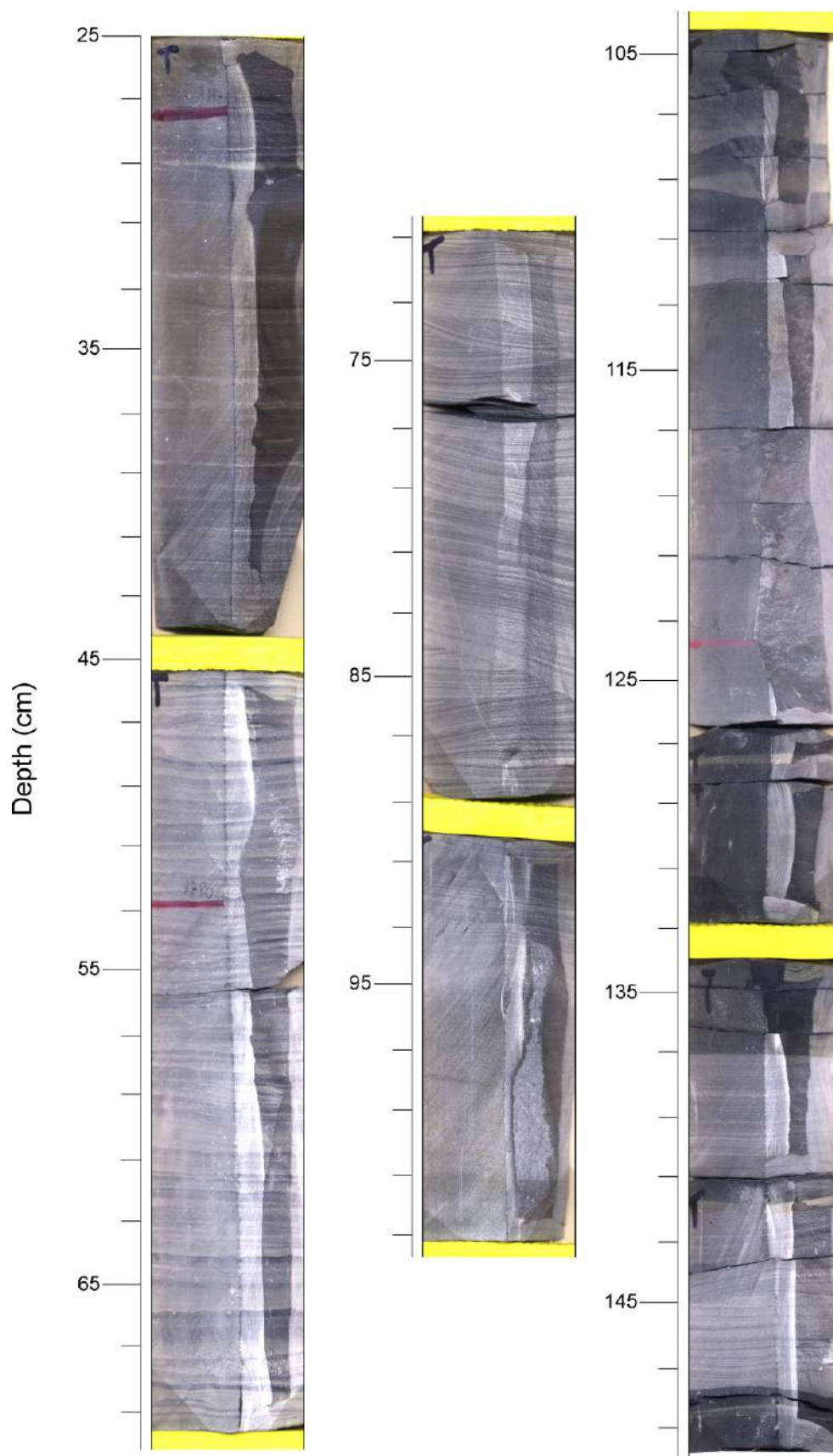


Figura B1 – Imagem RGB do grupo 1 de amostras selecionadas do testemunho ML-1. Ordem de topo a base: 74, 73, 71, 72, 69 e 70. Profundidade relativa.

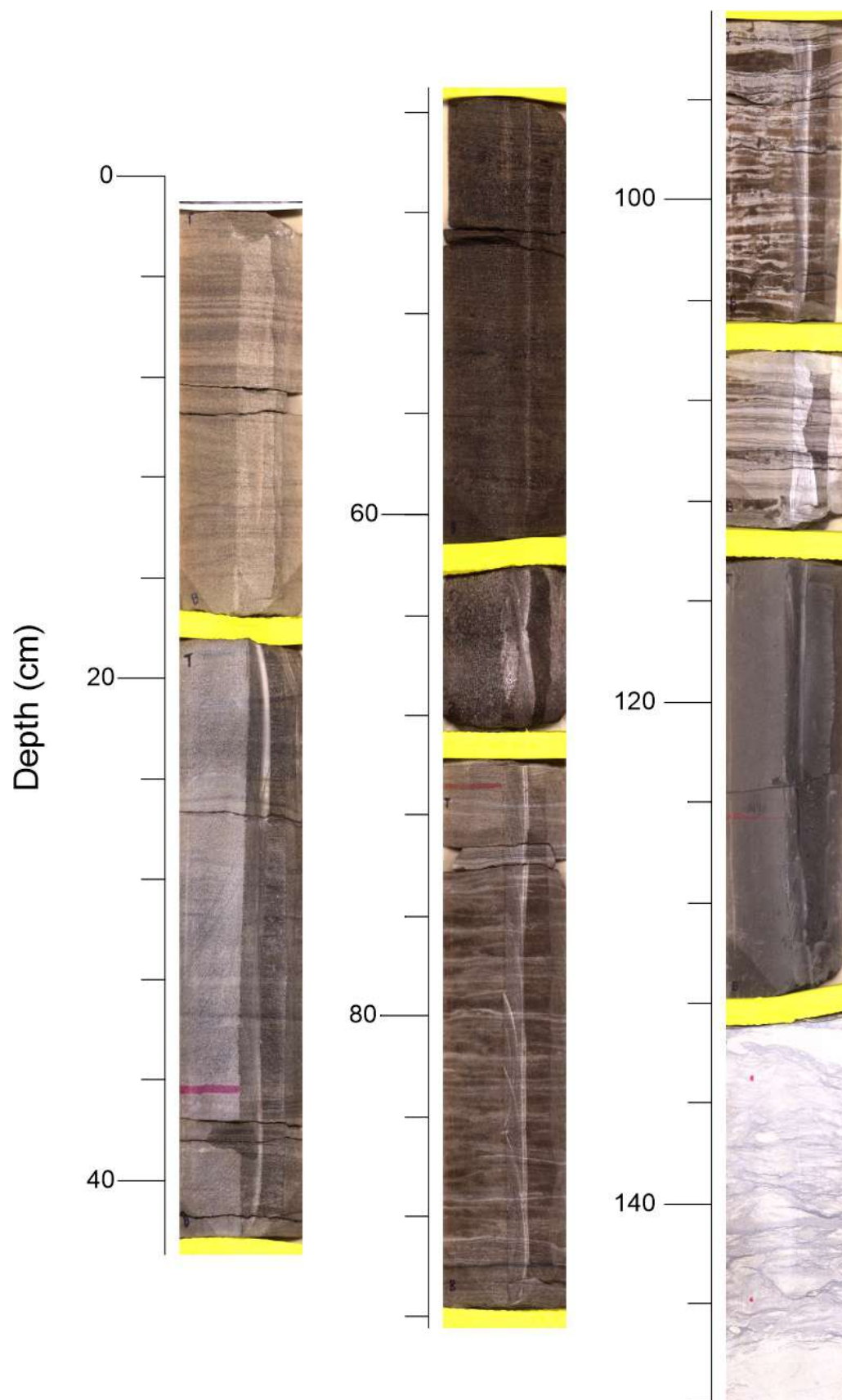


Figura B2 – Imagem RGB do grupo 2 de amostras selecionadas do testemunho ML-1. Ordem de topo a base: 11, 14, 20, 21, 24, 29, 30A, 30B e 87. Profundidade relativa.

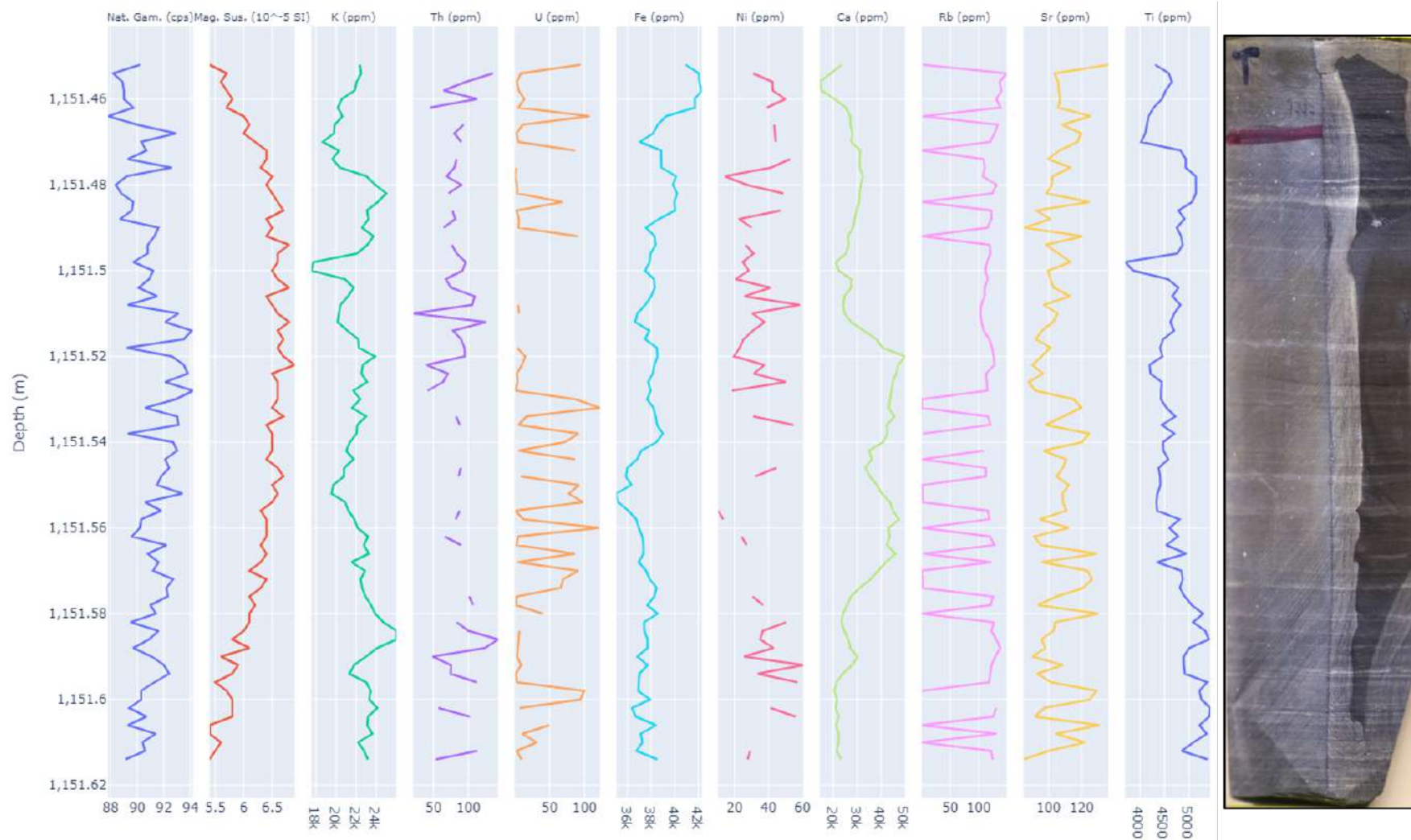


Figura B3 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-74.

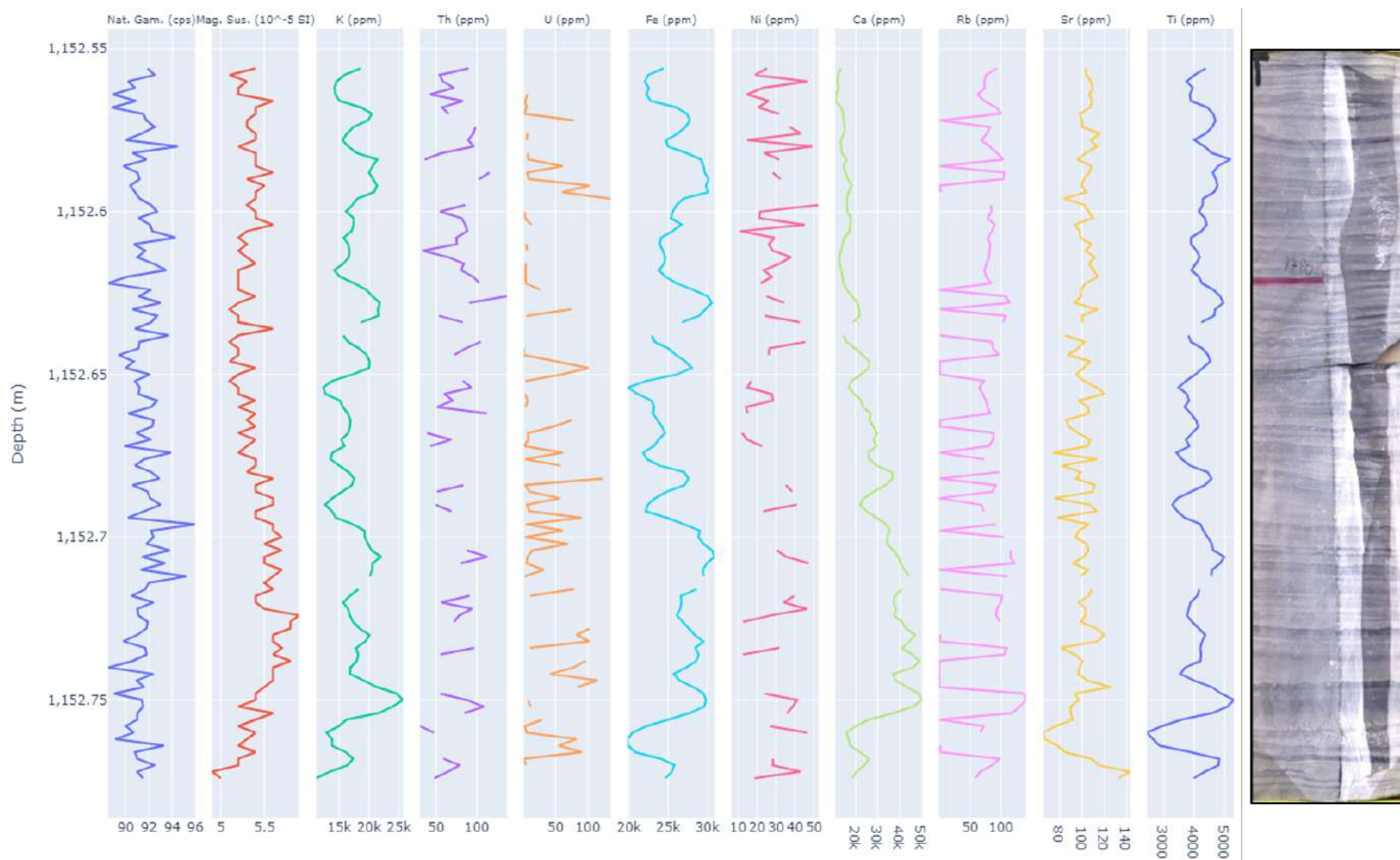


Figura B4 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-73.

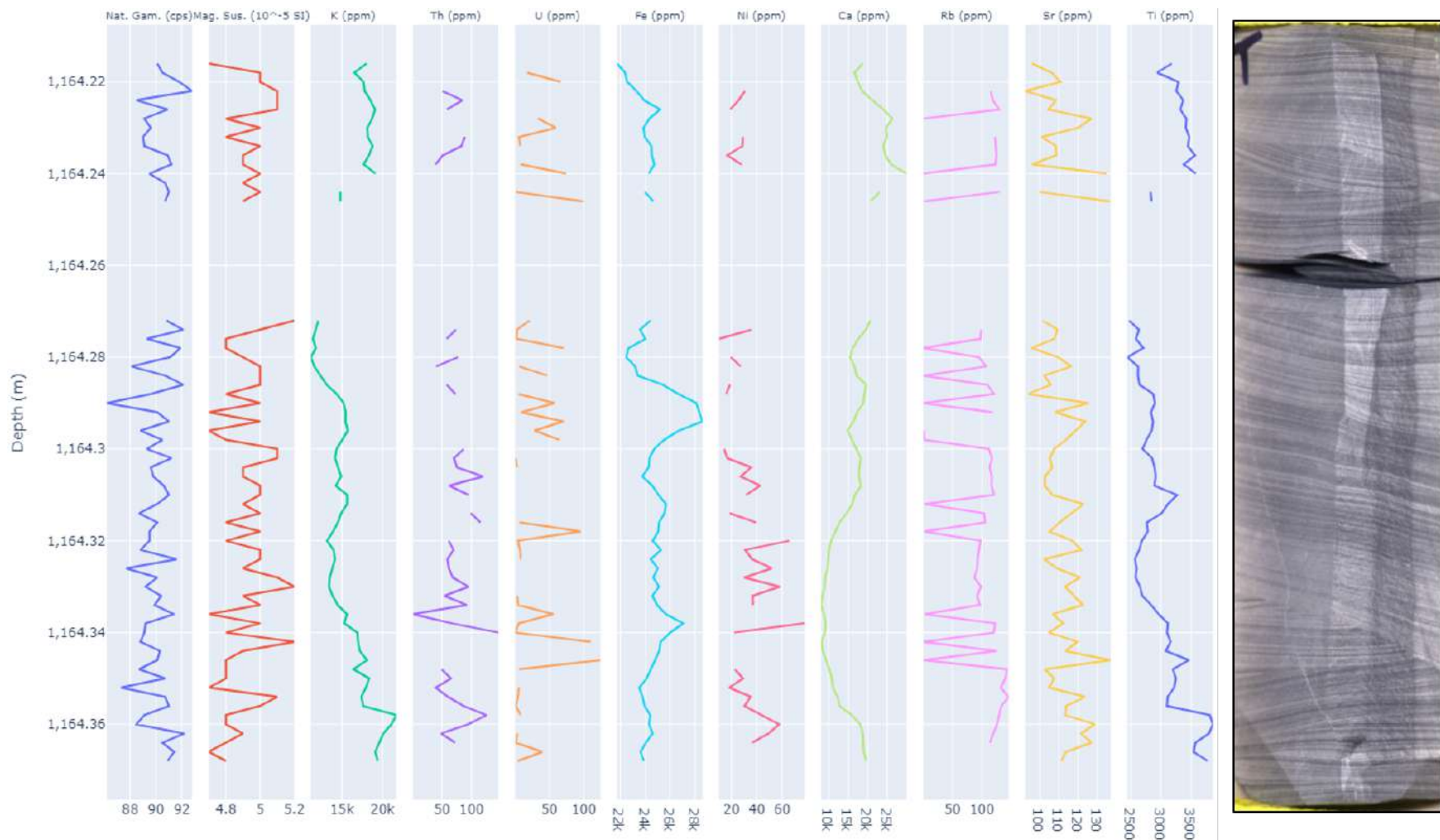


Figura B5 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-71.

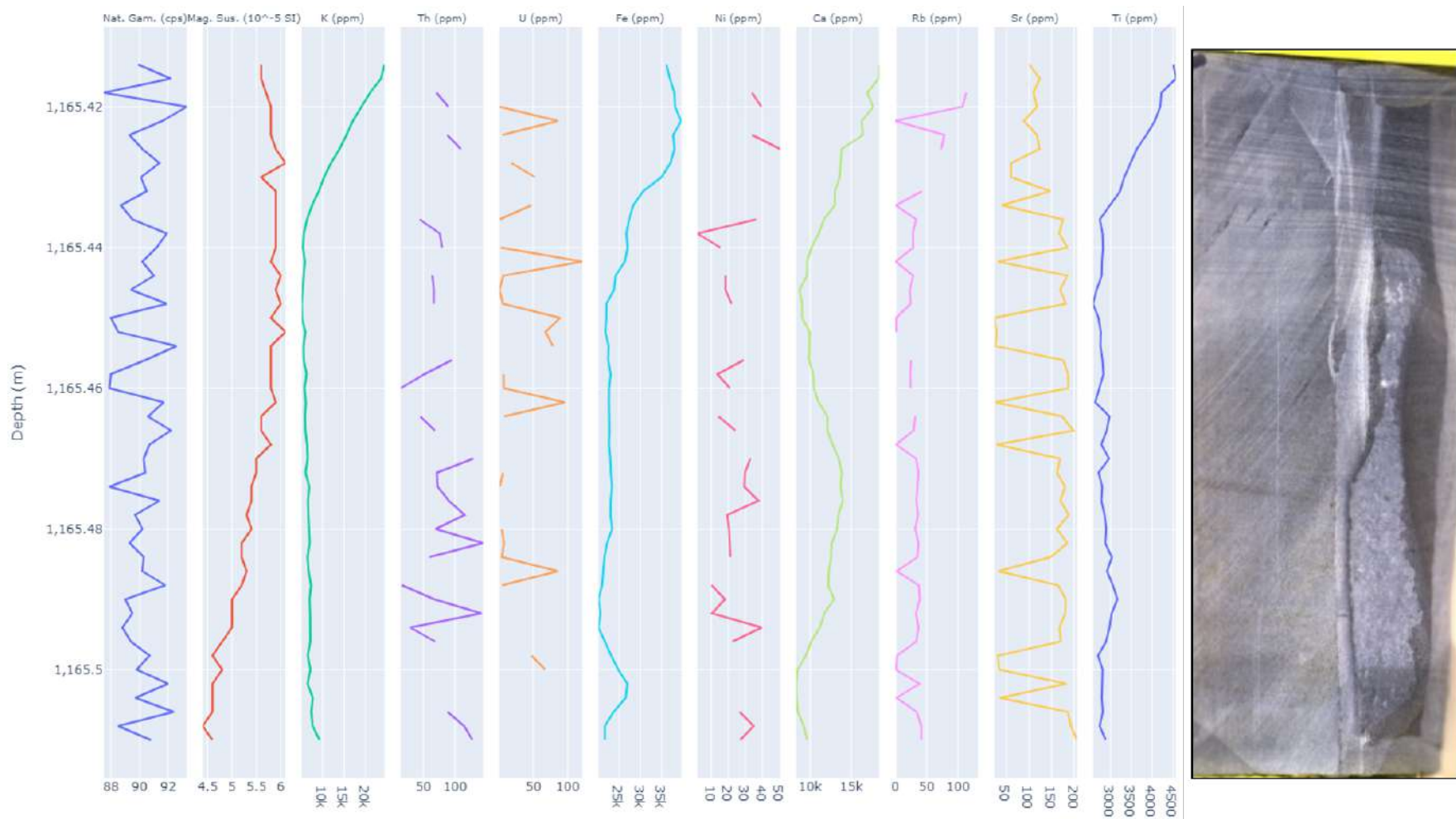


Figura B6 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-72.

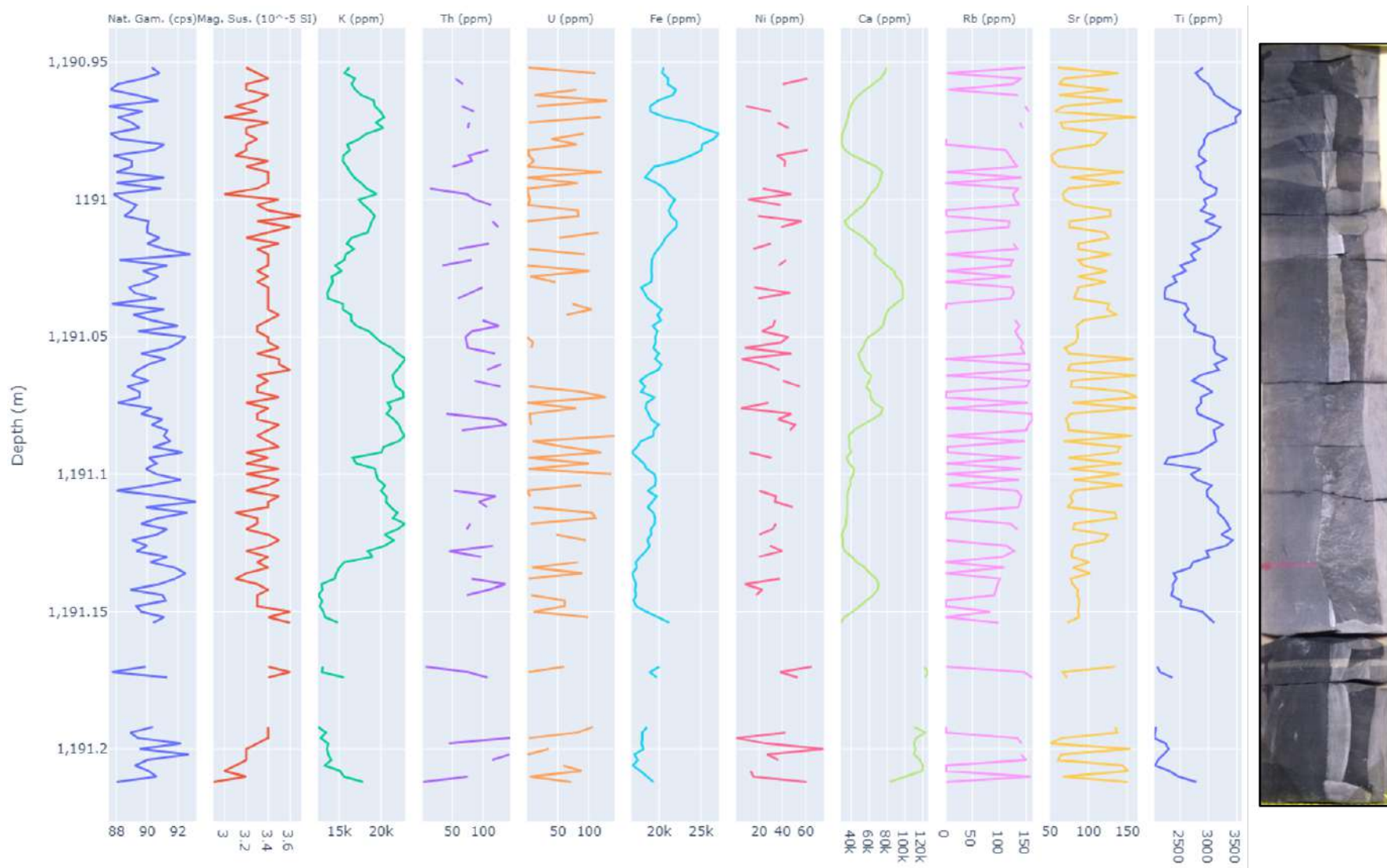


Figura B7 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-69.

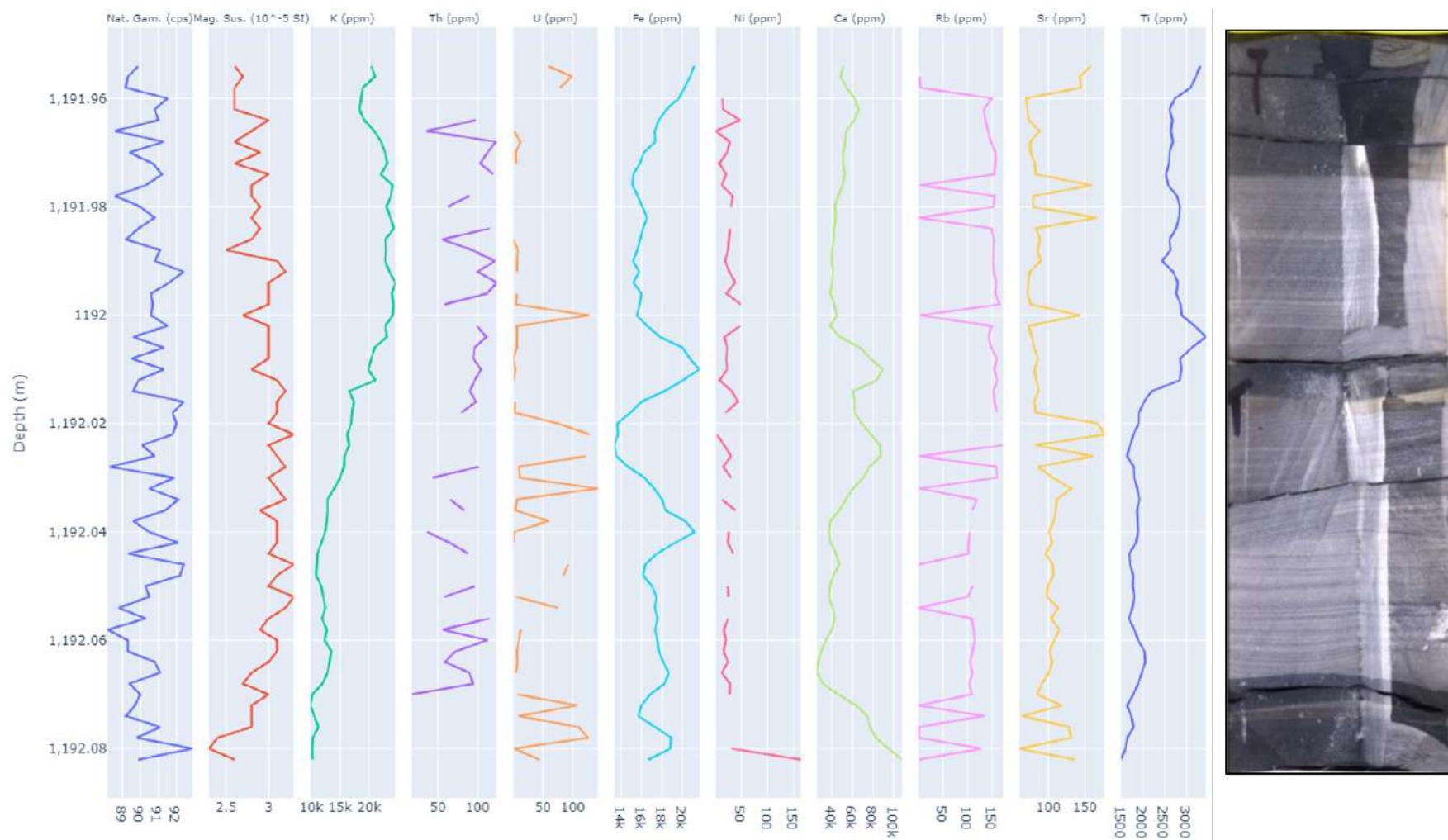


Figura B8 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-70.

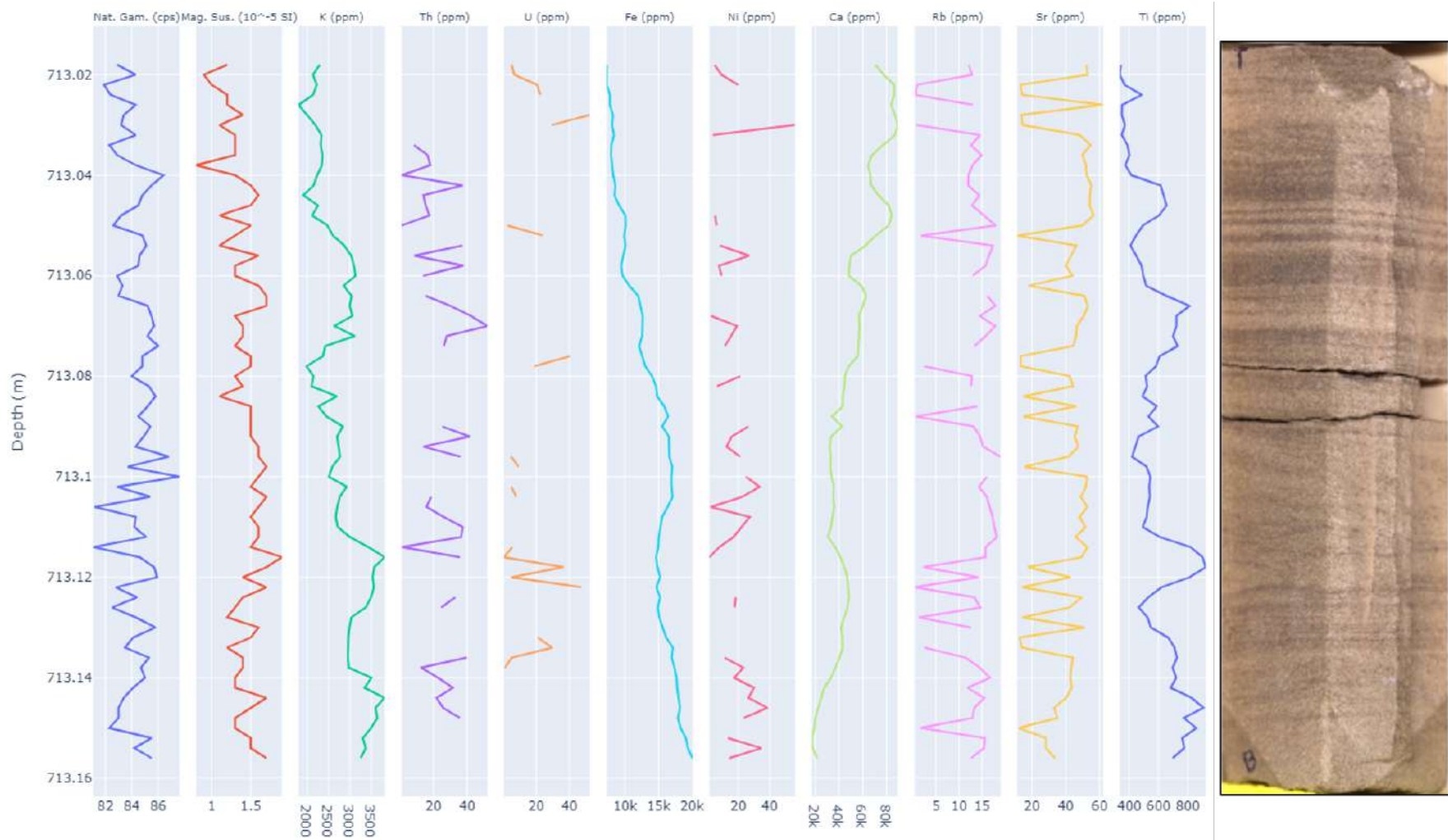


Figura B9 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-11.

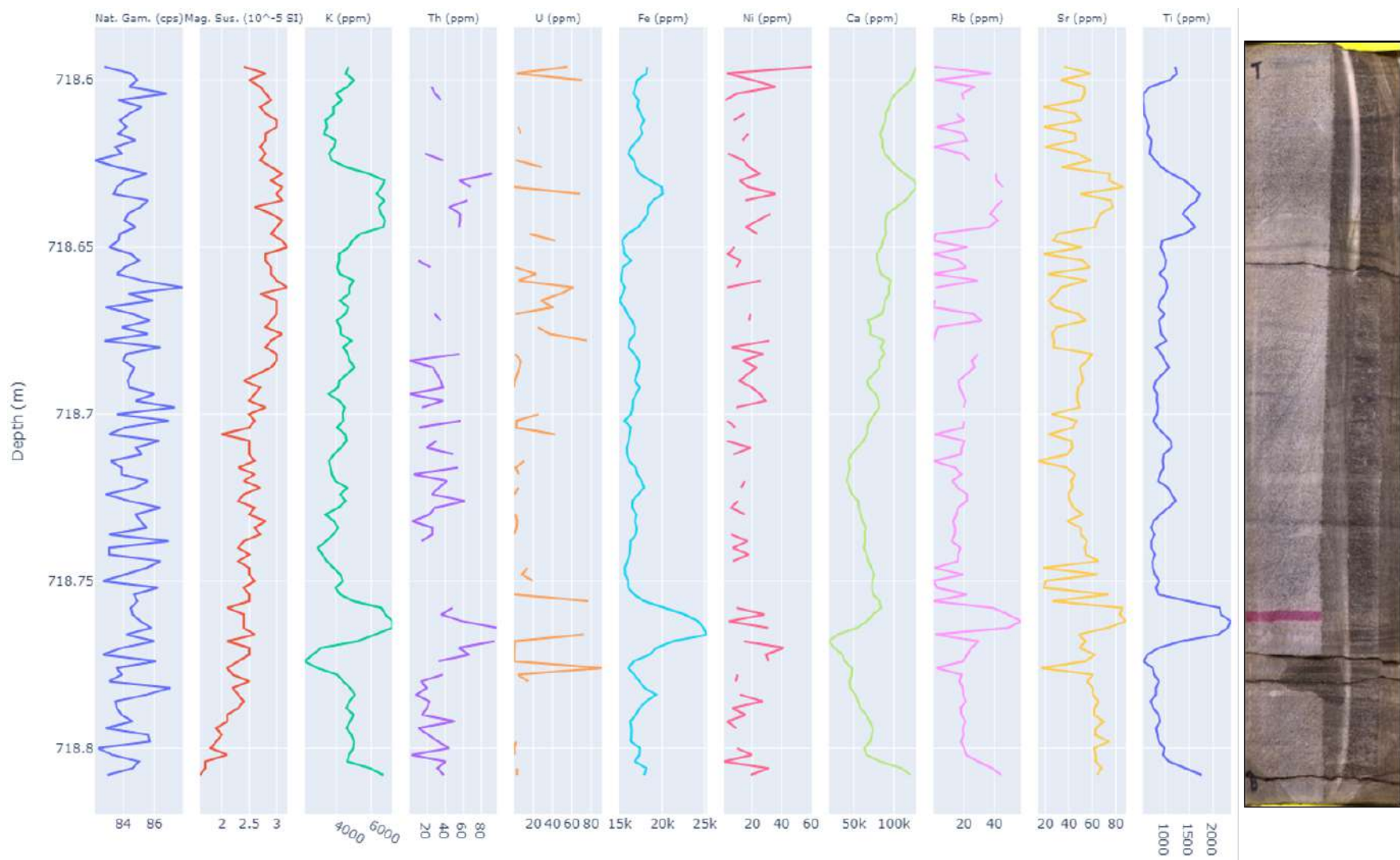


Figura B10 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-14.

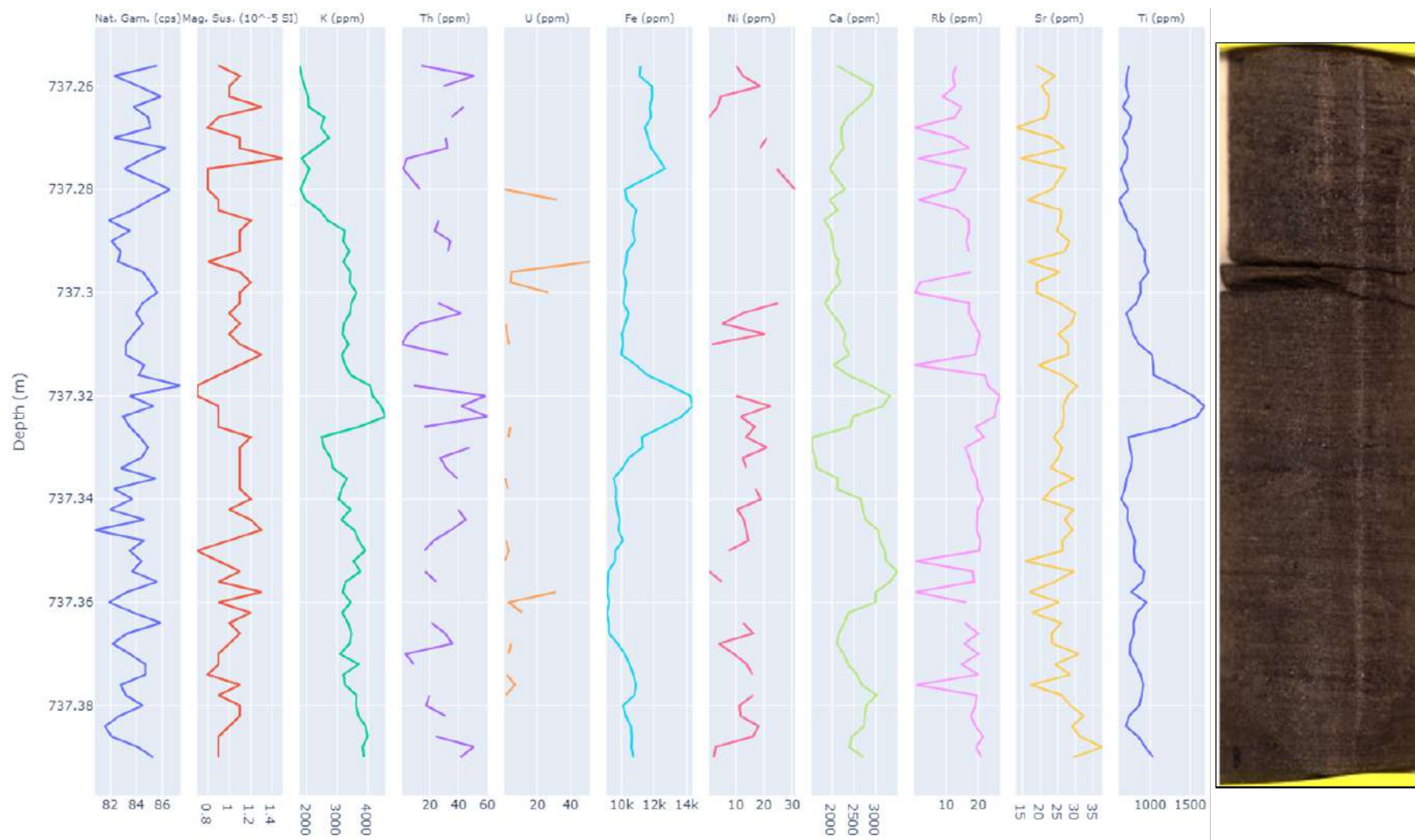


Figura B11 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-20.

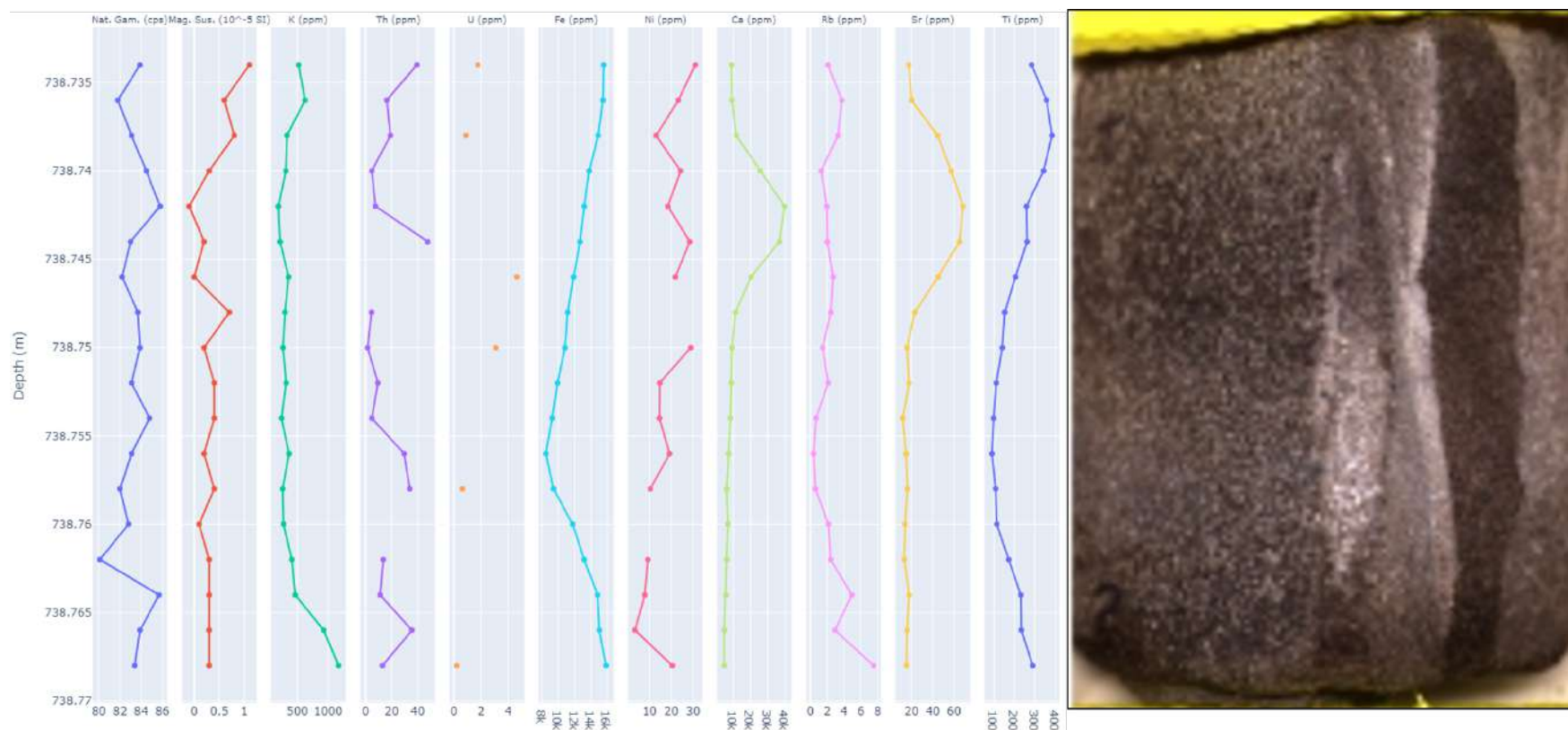


Figura B12 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-21.

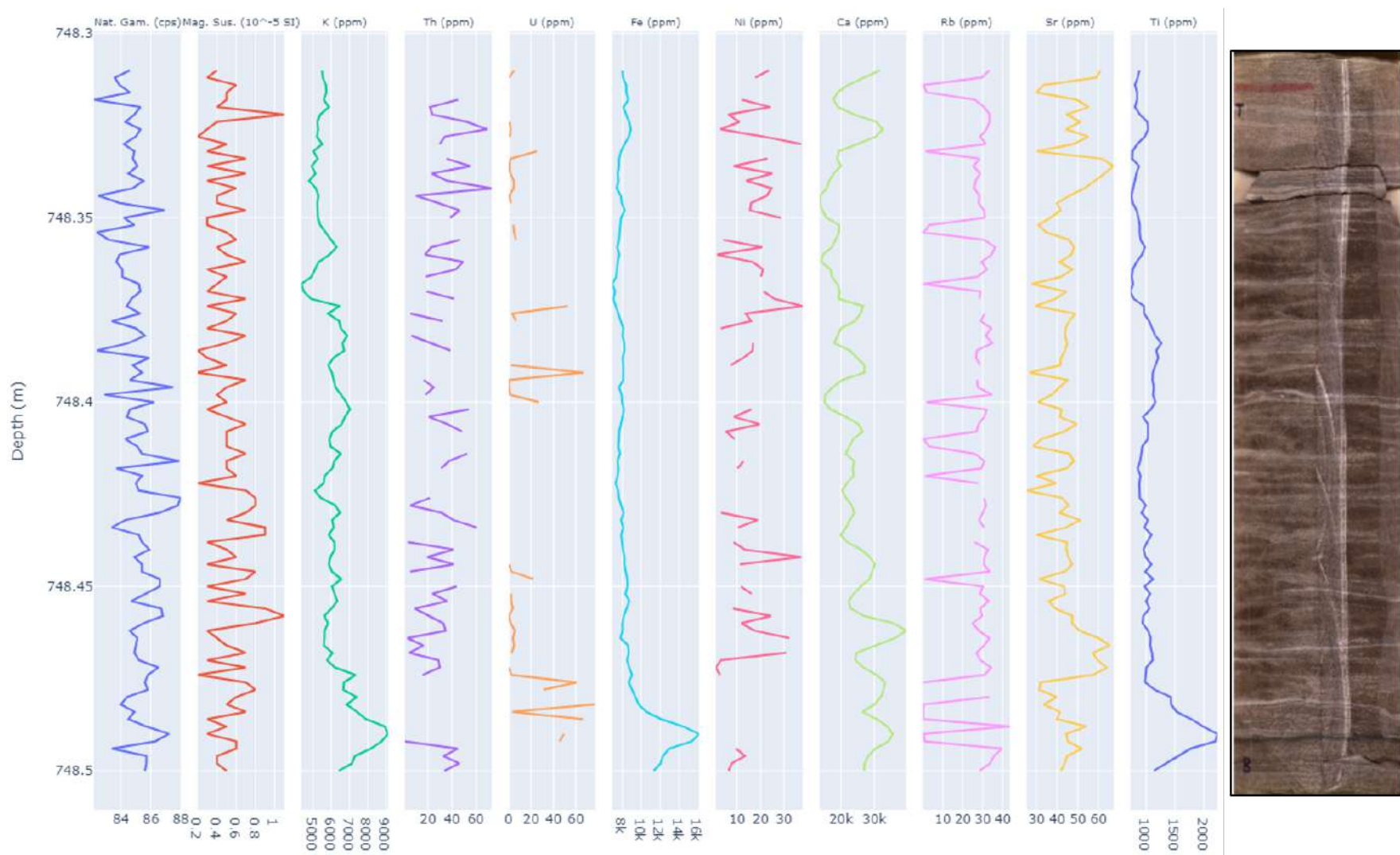


Figura B13 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-24.

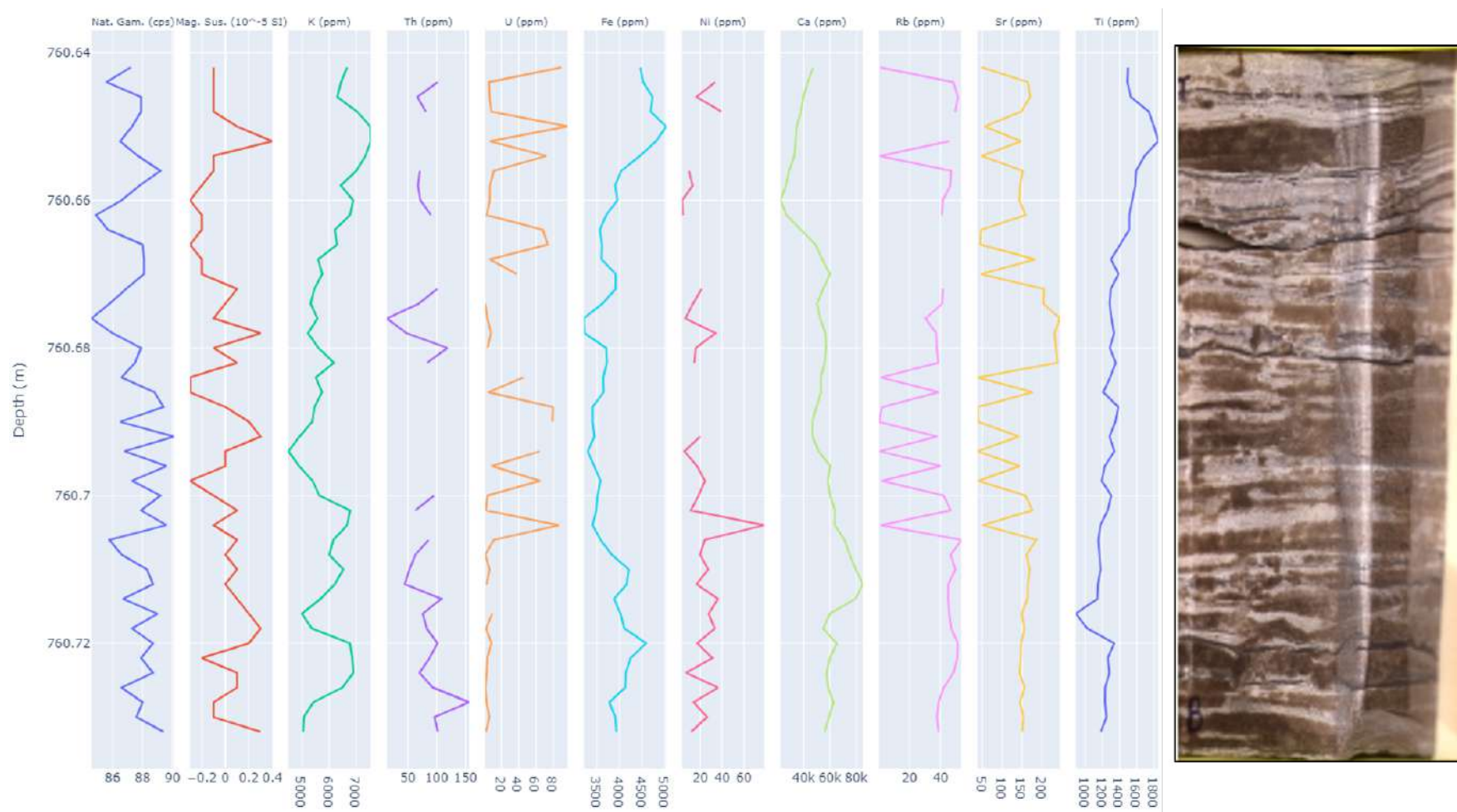


Figura B14 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-29.

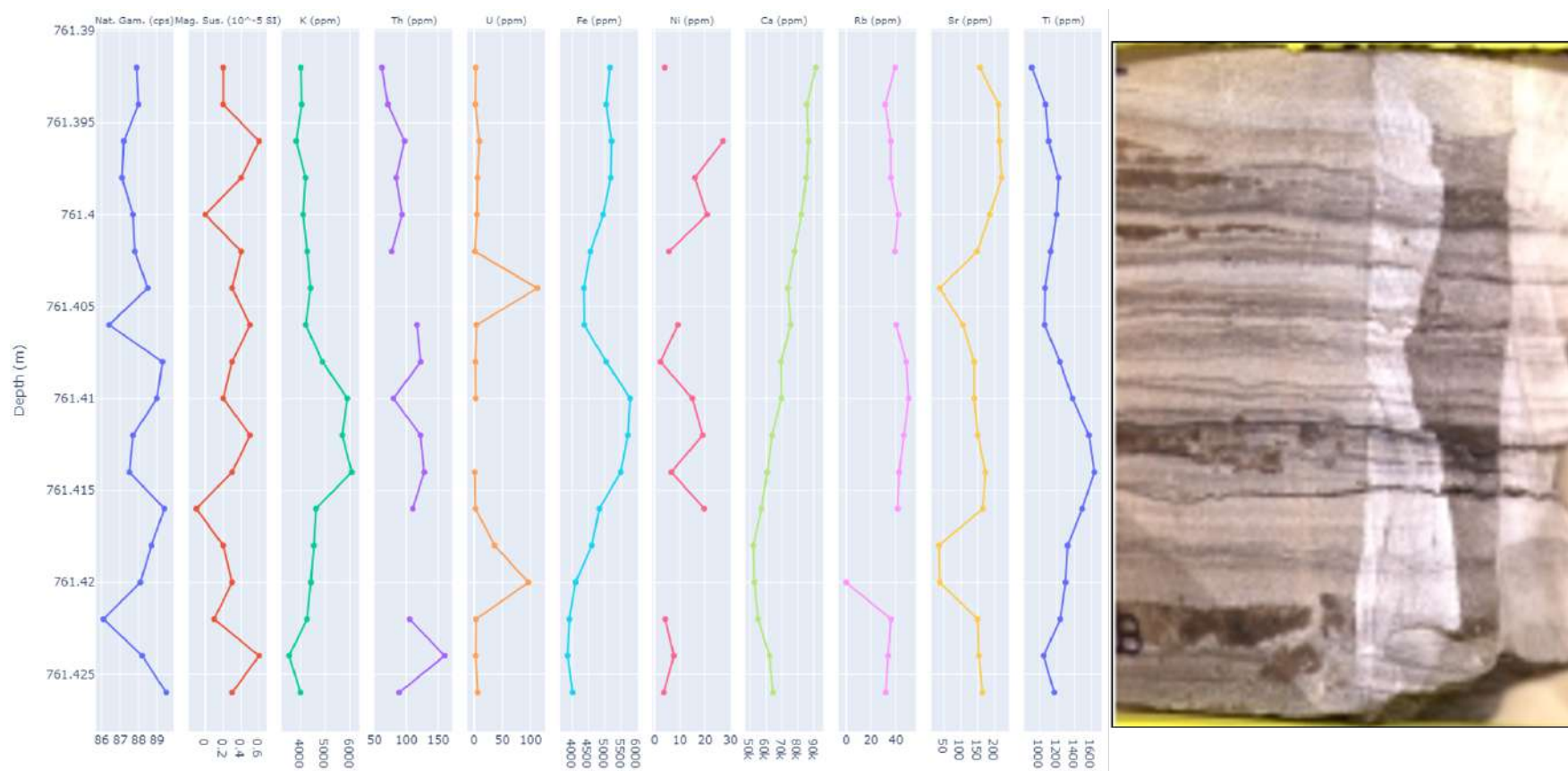


Figura B15 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-30A.

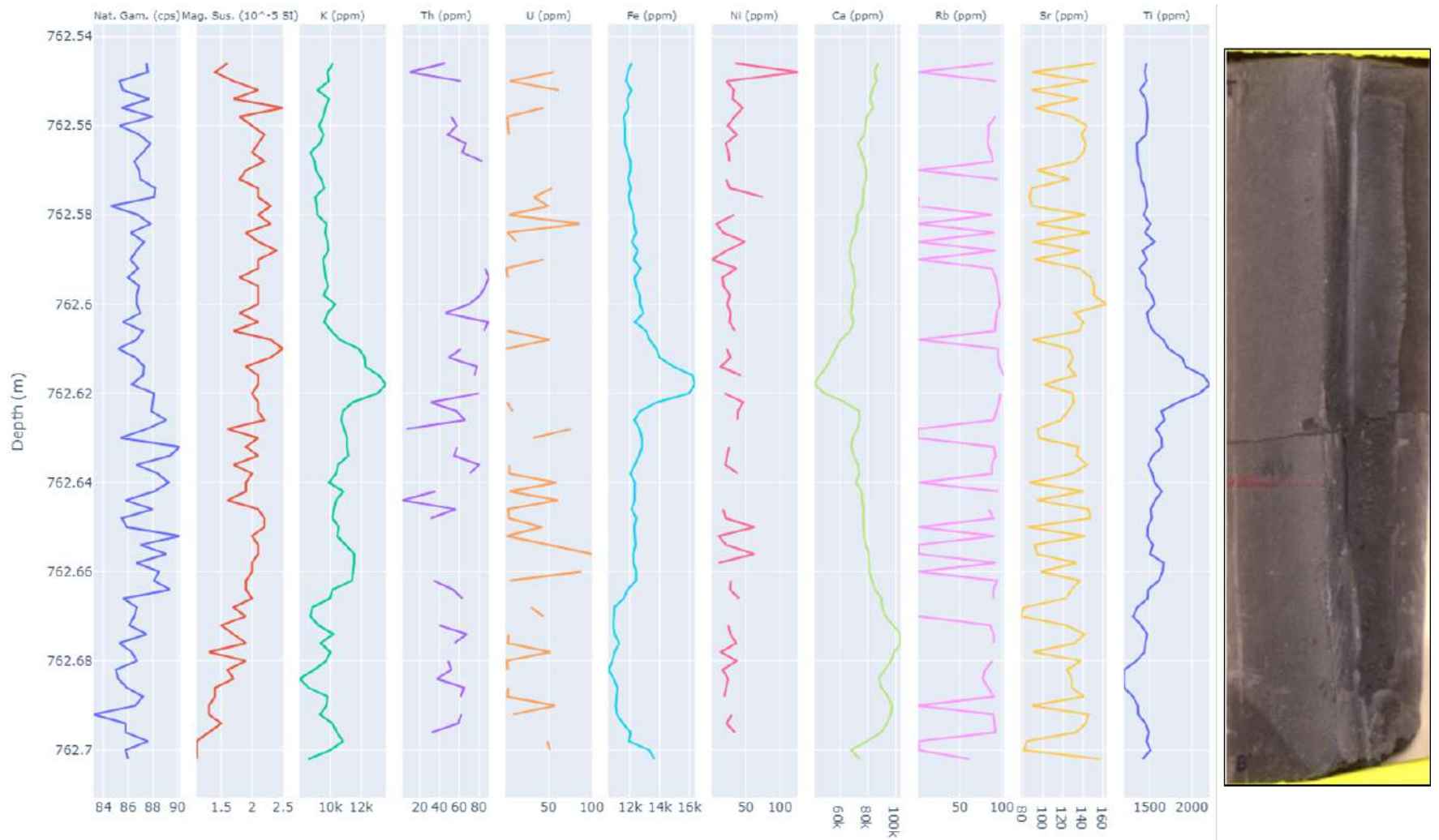


Figura B16 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-30B.

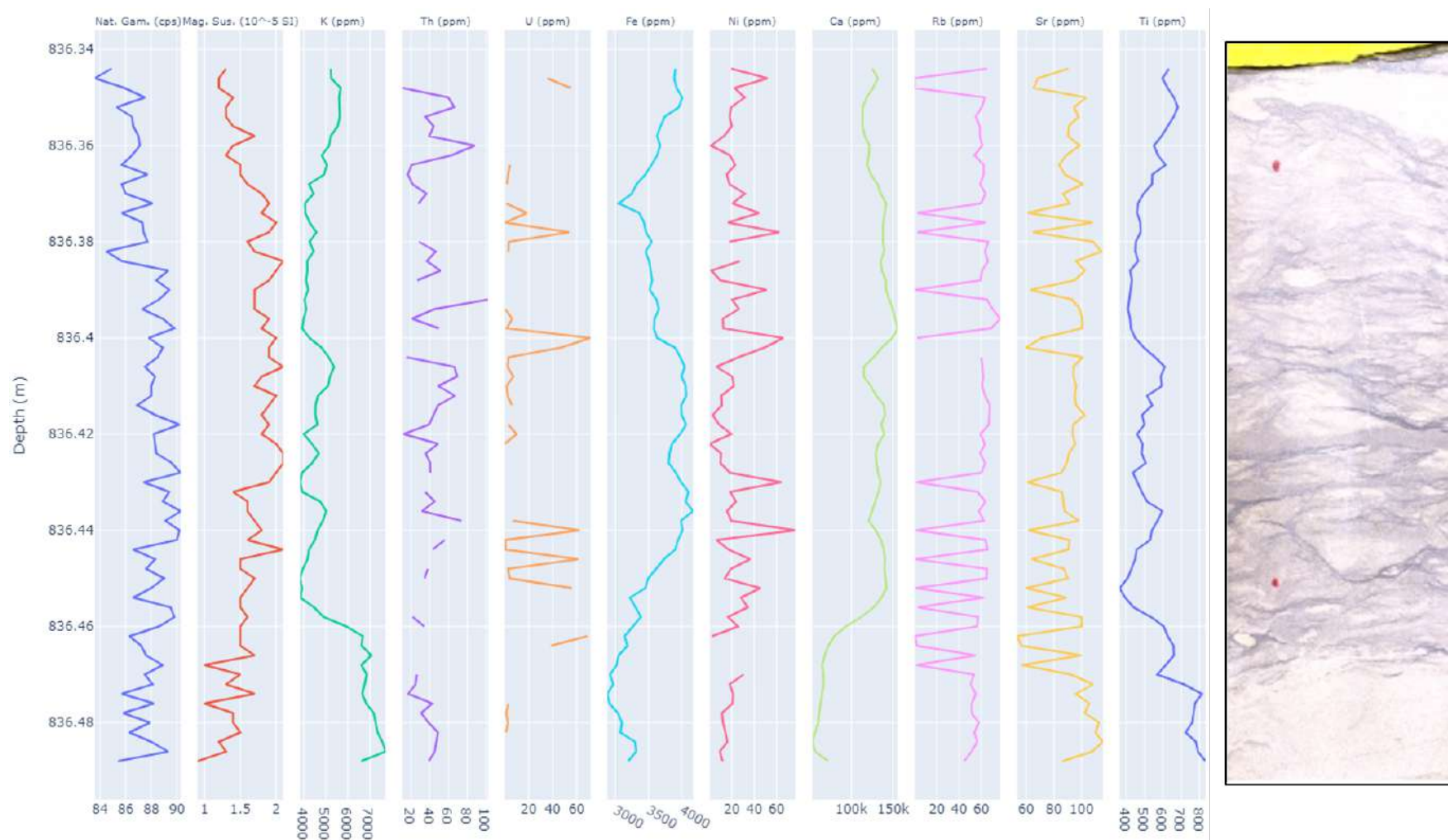


Figura B17 – Curvas de Radiação Gama Natural, Susceptibilidade Magnética, elementos traço, e imagem RGB da amostra ML-87.

**Resultados de amostras selecionadas do testemunho ML-1
usando equipamento MSCL**

Tabela C1 – Resultados do grupo 1 de amostras

N°	Estat.	Nat. Gam. (cps)	Mag. (10 ⁻⁵ SI)	Sus.	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)
G1	Mín.	86.2	2.3		5067.61	0.87	0.04	13320.33	0.06	8076.19	0	22.9	1491
	Máx.	96	6.9		30144.62	145.55	142.26	42289.65	163.03	126322.62	173	206	5430.9
	Méd.	90.63	4.65		17223.16	79.77	36.96	25154.81	30.83	36163.79	80.81	105.58	3439.98
	Desv. P.	1.45	1.22		4808.56	27.85	41.99	7131.04	14.94	24293.63	56.25	30.46	945.05
	CV (%)	1.6	26.25		27.92	34.91	113.59	28.35	48.45	67.18	69.61	28.85	27.47
74	Mín.	87.8	5.4		17537.39	20.68	0.22	35035.43	10.3	14349.86	0.3	84.8	3697.8
	Máx.	94.2	6.9		25989.24	142.9	121.93	42289.65	60.59	50034.71	149	136.2	5430.9
	Méd.	91	6.25		22085.16	82.58	30.86	38051.12	35.76	31293.58	89.6	106.36	4718.75
	Desv. P.	1.52	0.4		1611.86	24.27	38.95	1468.32	11.94	8927.58	53.49	11.93	379.6
	CV (%)	1.67	6.41		7.3	29.39	126.22	3.86	33.39	28.53	59.7	11.21	8.04
73	Mín.	88.5	4.9		11092.3	29.86	0.08	19838.79	6.55	10816.79	0.1	64.8	2436.8
	Máx.	96	5.9		25709.5	137.17	135.91	30924.27	52.31	50117.5	140.7	142.8	5295.4
	Méd.	91.5	5.39		17426.4	76.41	32.58	25942.25	29.59	25355.17	65.44	100.88	4158.24
	Desv. P.	1.31	0.19		2778.14	23.07	38.06	2813.77	10.73	11116.69	42.53	12.17	506.84
	CV (%)	1.43	3.5		15.94	30.2	116.82	10.85	36.25	43.84	64.99	12.07	12.19
71	Mín.	86.2	4.7		11173.68	0.87	0.04	21727.8	10.15	8076.19	0.1	92.5	2448
	Máx.	92.8	5.2		21711.41	145.55	124.32	28585.64	77.85	29896.85	145.5	137	3851.7
	Méd.	90.07	4.92		15921.16	72.37	28.64	24619.2	32.01	16272.05	89.44	111.83	3041.58
	Desv. P.	1.25	0.13		2541.71	25.39	35.12	1293.48	14.39	5338.64	49.57	10.17	363.92
	CV (%)	1.39	2.69		15.96	35.09	122.66	5.25	44.96	32.81	55.42	9.09	11.96

Tabela C1 – Continuação.

N°	Estat.	Nat. Gam. (cps)	Mag. (10 ⁻⁵ SI)	Sus.	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)
	Mín.	87.5	4.4		5067.61	14.3	0.76	20106.04	1.79	8324.15	0	22.9	2579.3
	Máx.	93.3	6.1		24430.17	144.49	121.15	39634.13	50.29	18372.56	131.8	206	4571.1
72	Méd.	90.26	5.48		8517.46	77.3	37.36	25976.95	25.43	12003.81	33.62	129.85	3054.02
	Desv. P.	1.39	0.48		4807.17	33.97	40.9	5904.39	10.48	2668.89	28.93	62.93	496.69
	CV (%)	1.54	8.67		56.44	43.94	109.47	22.73	41.23	22.23	86.05	48.46	16.26
	Mín.	87.5	2.9		12470.46	2.18	0.15	16729.71	0.06	28155.69	0	49.9	2045.3
	Máx.	93.2	3.7		22932.64	143.31	141.4	27166.34	75.58	126322.62	162	162.9	3588.2
69	Méd.	90.04	3.34		17665.99	84.23	49.58	19557.89	32.72	61442.24	86.05	97.71	2821.4
	Desv. P.	1.33	0.14		3092.34	31.21	46.93	1956.18	15.62	26369.95	64.66	31.91	367.21
	CV (%)	1.47	4.17		17.5	37.05	94.65	10	47.73	42.92	75.14	32.66	13.02
	Mín.	88.2	2.3		9866.01	16.95	0.13	13320.33	1.08	25528.69	0.2	60.8	1491
	Máx.	92.9	3.3		24531.69	124.16	142.26	21665.33	163.03	108165.18	173	177.2	3450.8
70	Méd.	90.49	2.92		17182.87	87.79	37.37	17176.44	27.05	54128.48	108.57	101.23	2275.09
	Desv. P.	1.12	0.22		5041.02	25.82	46.58	1977.68	22.15	18159.16	59.97	28.7	543.69
	CV (%)	1.24	7.6		29.34	29.41	124.63	11.51	81.88	33.55	55.23	28.35	23.9

Tabela C2 – Resultados do grupo 2 de amostras

N°	Estat.	Nat. Gam. (cps)	Mag. (10 ⁻⁵ SI)	Sus.	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)
G2	Mín.	80.1	-0.3		188.91	0.09	0	339.15	0.15	1517.66	0.01	0.44	89.56
	Máx.	90.5	3.2		13595.01	160.18	112.11	25245.85	126.24	263880	102.51	260.86	2371.7
	Méd.	85.53	1.31		5175.63	41.68	18.22	10564.07	18.72	58107.98	30.12	68.97	967.81
	Desv. P.	1.97	0.88		2545.78	27.79	24.97	4918.03	13.32	42035.55	26.84	48.81	416.43
	CV (%)	2.3	NaN		49.19	66.69	137.04	46.55	71.14	72.34	89.09	70.77	43.03
11	Mín.	81.1	0.8		1801.55	0.97	0.41	7235.15	1.36	17222.12	0.35	11.32	335.25
	Máx.	87.6	1.9		3808.15	51.91	52.47	20091.7	56.47	89424.41	19	62.13	923.76
	Méd.	84.28	1.42		2783.73	25.76	16.5	13428.16	17.2	50193.52	12.42	39.02	581.04
	Desv. P.	1.3	0.21		515.7	12.44	14.74	3780.62	10.84	19796.13	5.39	15.33	155.55
	CV (%)	1.54	14.66		18.53	48.27	89.37	28.15	63.01	39.44	43.38	39.3	26.77
14	Mín.	82.2	1.6		2203.49	0.09	0.06	14912.95	0.6	18631.5	0.04	13.89	524.64
	Máx.	87.8	3.2		7214.26	97.69	91.46	25245.85	60.62	127912.7	57.66	88.86	2371.7
	Méd.	84.52	2.59		4589.71	35.93	18.38	17207.4	16.1	75956.11	19.37	48.97	1000.15
	Desv. P.	1.18	0.36		1025.92	21.26	24.78	1814.07	10.76	23011.43	13.28	17.55	381.34
	CV (%)	1.4	13.72		22.35	59.17	134.83	10.54	66.85	30.3	68.56	35.84	38.13
20	Mín.	80.8	0.7		1769.13	0.71	0.12	9093.74	0.59	1531.49	0.04	13.24	608.44
	Máx.	87.4	1.5		4565.63	60.23	51.87	14355.38	30.98	3489.03	26.65	37.54	1680.52
	Méd.	83.92	1.02		3160.56	27.39	8.93	10689.74	13.2	2419.34	15.75	24.81	850.54
	Desv. P.	1.32	0.16		660.8	14.88	13.56	1164.91	7.18	461.4	6.83	4.67	211.43
	CV (%)	1.57	15.59		20.91	54.33	151.86	10.9	54.37	19.07	43.37	18.81	24.86

Tabela C2 – Continuação.

N°	Estat.	Nat. Gam. (cps)	Mag. (10 ⁻⁵ SI)	Sus.	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)
21	Mín.	80.1	-0.1		188.91	1.44	0.21	8485.79	3.36	4834.01	0.37	11.74	89.56
	Máx.	85.8	1.1		1170.97	47.76	4.64	15847.63	31.04	39713.95	7.52	68.43	384.16
	Méd.	83.38	0.36		418.95	18.26	1.87	12614.55	18.06	12918.66	2.48	27.39	212.76
	Desv. P.	1.39	0.29		257.76	14.43	1.7	2394.56	8.13	10638.56	1.69	19.29	94.97
	CV (%)	1.66	NaN		61.52	79.07	90.68	18.98	45	82.35	68.22	70.42	44.64
24	Mín.	82.2	0.2		4355.99	0.85	0	6915.81	0.9	13570.12	0.14	25.29	725.41
	Máx.	88	1.1		9114.89	73.23	77.38	16111.72	37.99	39566.18	43.59	67.25	2231.74
	Méd.	85.04	0.51		6071.24	30.46	14.62	8488.75	15.25	23798.34	24.91	44.16	1041.77
	Desv. P.	1.17	0.2		875.57	16.1	21.74	1636.92	9.17	5902.69	11.89	9.3	281.87
	CV (%)	1.37	38.86		14.42	52.86	148.69	19.28	60.15	24.8	47.72	21.06	27.06
29	Mín.	84.6	-0.3		4491.2	13.55	1.39	3206.26	3.27	22393.95	0.29	37.45	890.85
	Máx.	90.1	0.4		7548.2	156.72	96.5	5025.28	78.93	85177.38	53.4	244.87	1847.2
	Méd.	87.57	-0.02		6032.48	81.33	24.22	3892.05	20.61	52923.18	35.68	136.9	1342.84
	Desv. P.	1.3	0.18		770.43	25.09	31.52	444.99	13.97	14182.16	17.49	61.18	194.33
	CV (%)	1.49	NaN		12.77	30.85	130.13	11.43	67.78	26.8	49.03	44.69	14.47
30A	Mín.	86.1	-0.1		3553.27	61.76	1.38	3848.84	2.36	51972.51	0.01	35.34	905.5
	Máx.	89.5	0.6		6075.92	160.18	112.11	5789.39	27.13	91238.18	50.3	220.28	1634.49
	Méd.	88.01	0.29		4509.34	101.2	17.65	4786.74	11.53	70246.22	37.18	143.74	1229.01
	Desv. P.	0.96	0.19		705.49	26.06	33.67	604.67	7.91	12567.35	11.35	56.78	194.43
	CV (%)	1.1	NaN		15.64	25.75	190.73	12.63	68.58	17.89	30.51	39.5	15.82

Tabela C2 – Continuação.

N°	Estat.	Nat. Gam. (cps)	Mag. (10 ⁻⁵ SI)	Sus.	K (ppm)	Th (ppm)	U (ppm)	Fe (ppm)	Ni (ppm)	Ca (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (ppm)
30B	Mín.	83.2	1.1		8026.02	2.5	0.35	10558.64	0.15	42022.15	0.18	77.5	1194.49
	Máx.	90.2	2.5		13595.01	90.25	100.44	16369.15	126.24	103683.4	102.51	163.71	2215.69
	Méd.	86.91	1.9		10154.47	54.83	27.95	12298.25	29.34	77006.43	66.84	121.31	1515.43
	Desv. P.	1.29	0.32		1059.55	22.93	28.94	1098.77	17.78	12505.83	40	23.79	182.21
	CV (%)	1.49	16.98		10.43	41.81	103.56	8.93	60.59	16.24	59.84	19.61	12.02
87	Mín.	83.6	0.9		3819.14	10.82	0.05	2876.12	0.26	53121.55	0.1	53.51	363.71
	Máx.	90.3	2.1		7722.22	102.3	71.8	4167.89	77.01	156053.3	77.36	115.57	831.51
	Méd.	87.71	1.64		5052.24	40.63	16.79	3590.03	22.31	118750.4	49.1	89.41	549.71
	Desv. P.	1.5	0.29		1086.07	18.03	23.12	357.14	15.82	28534.76	24.11	15.78	114.16
	CV (%)	1.71	17.43		21.5	44.37	137.7	9.95	70.94	24.03	49.09	17.65	20.77

Anexos

Referencia de elementos traço

Anexo 1 – Tabela de elementos usados para a análise de teores segundo a composição da Crosta Continental Superior de McLennan (2001).

Elemento (ppm)	
K	28000
Th	10,7
U	2,8
Fe	35000
Ni	44
Ca	30000
Rb	112
Sr	350
Ti	4100