

Universidade de São Paulo
Disciplina: EAH-5003 – Redação Científica (2023-1)

Docentes Responsáveis:

Profa. Dra. Fátima de Lourdes dos Santos Nunes Marques

Profa. Dra. Flávia Mori Sarti

Aluno: Fábio Palma de Lima – NUSP: 9580985

Atividade 4 – Descrição dos Resultados

Título do artigo:

Desafios do *kick-off point* na Formação Irati, Bacia do Paraná (ainda provisório).

Objetivos:

Avaliar a composição mineralógica das rochas da Formação Irati – Bacia do Paraná e estabelecer critérios mineralógicos para uma das tarefas envolvidas na extração do gás não-convencional que é a definição do *kick-off point* durante a perfuração direcional, ou seja, a transição entre poços vertical e horizontal.

Informações a respeito do veículo: Revista Geoenergy Science and Engineering

A título informativo, segue abaixo descrição do escopo de abrangência da revista, tal qual consta no sítio eletrônico do editor.

O objetivo da Ciência e Engenharia da “Geoenergia” é preencher a lacuna entre a engenharia e a ciência da geoenergia e produção sustentável de hidrocarbonetos, publicando textos explicitamente escritos artigos inteligíveis para cientistas, engenheiros e geólogos que trabalham em áreas afins.

Ciência e Engenharia de Geoenergia abrange os campos de geoenergia e hidrocarbonetos sustentáveis produção em seu sentido mais amplo. A revista tem como objetivo publicar artigos com um foco particular na transição energética e na obtenção de metas de emissões líquidas zero. Os tópicos gerais incluem: responsável e geração sustentável de energia; captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS); energia geotérmica; produção, transporte e armazenamento de hidrogênio; armazenamento subterrâneo de gás; aplicação de artificial inteligência, aprendizado de máquina e análise de dados na indústria de energia; e hidrocarboneto sustentável exploração e produção.

Os artigos serão publicados com o mínimo de atraso de publicação. Artigos de pesquisa, histórias de casos, campo relatórios de processos, comunicações curtas, resenhas de livros, atas de simpósios e artigos de revisão são aceitos. Geralmente, serão publicados artigos de revisão sobre algum tema de especial interesse atual.

Anteriormente conhecido como Journal of Petroleum Science and Engineering, com um IF 2021 de 5,168 em 2021.

Fatores considerados para escolha do veículo:

Além de impacto de certa relevância (citescore = 8,1) para a área de interesse do artigo, a revista trata da temática da transição da matriz energética de forma cuidadosa e sustentável.

Resultados

Observação: as figuras e tabelas ainda não se encontram numeradas corretamente, uma vez que o texto é utilizado para fins de cumprir o exercício, para entrega do artigo final, a codificação será corretamente ajustada.

A seção de resultados deste artigo científico apresenta um total de cinco subcapítulos, sendo que três deles foram elaborados a partir de pesquisas realizadas de sondagens realizadas na Formação Irati. O quarto subcapítulo foi construído a partir de pesquisa de campo, que fornece dados mais concretos e específicos de amostras de folhelho coletadas. Já o quinto, e último subcapítulo apresenta uma comparação a respeito da compilação dos quatro primeiros subcapítulos, com a experiência de países atualmente produtores em *shale gas*, oferecendo uma perspectiva mais prática e atualizada a respeito das necessidades geológicas para determinação do *kick-off point*.

1. Resultados obtidos a partir da análise de dados de perfis de sondagem da CPRM

O estudo da CPRM realizou 118 sondagens em quatro estados do Brasil e o trabalho de Aboarrage e Lopes (1986) descreveu a litologia de 37 sondagens, incluindo as profundidades de topo e base da Formação Irati. A espessura mínima da formação foi encontrada em um furo no Paraná e a máxima em um furo em São Paulo. A média de espessura para as 37 sondagens é de 37,23 m. O estudo também revelou que a formação foi depositada em ambiente marinho restrito e é predominantemente argilosa. Conclui-se, portanto, que a Formação Irati tem origem em ambiente marinho restrito e é composta principalmente por partículas de tamanho argila.

Figura XX – Mapa de isópacas (em metros) da seção permiana acima da Fm. Irati, contendo a distribuição do total de 118 sondagens executadas pela CPRM



Fonte: Construído pelo autor a partir de Aboarrage e Lopes (1986), CPRM (2016) e Zalán et al. (1990).

2. Resultado das análises referentes aos dados disponibilizados por ANP (2020)

Segundo a ANP (2020), dos mais de 30.000 poços já perfurados no Brasil, 125 foram perfurados na Bacia do Paraná, distribuídos em diferentes estados brasileiros. Um estudo realizado por Ramos e Formoso (1975) analisou 43 desses poços, sendo 37 deles inclusive, referenciados pela ANP. O estudo apresentou informações sobre a composição das rochas sedimentares da bacia, e identificou cinco poços "secos com indícios de gás natural". Esses cinco poços estão localizados em dois estados do PR, dois estados de SC e um estado do RS.

Figura XX – Mapa de isópacas (em metros) da seção permiana acima da Fm. Irati com a distribuição dos 125 poços registrados por ANP (2020) na Bacia do Paraná



Fonte: Construído pelo autor a partir de ANP (2020), CPRM (2016) e Zalán et al. (1990).

3. Resultado das análises referente ao trabalho de Ramos e Formoso (1975)

Um estudo de Ramos e Formoso (1975) analisou 1052 amostras de testemunhos de sondagem em 43 poços da Bacia do Paraná, identificando argilominerais presentes na região sul e leste. O estudo focou na Fm. Irati, sendo que oito poços apresentaram predominância de folhelho cinza escuro a preto. A análise de 35 amostras revelou a presença de quartzo, feldspato, illita, argilomineral interestratificado illita-montmorilonita e clorita, mas não encontraram caulinita. A espessura média da Fm. Irati é de 50 m nos estados do Paraná e Santa Catarina, e a maior espessura foi encontrada no poço 2-IT-1-RS, próximo à cidade de Santiago (RS).

Figura XX – Mapa de isópacas (em metros) seção permiana acima da Fm. Irati com a distribuição dos 43 poços registrados do trabalho de Ramos e Formoso (1975)



Fonte: Construído pelo autor a partir de CPRM (2016), Ramos e Formoso (1975) e Zalán et al. (1990).

4. Resultados das amostras analisadas no IEE/USP

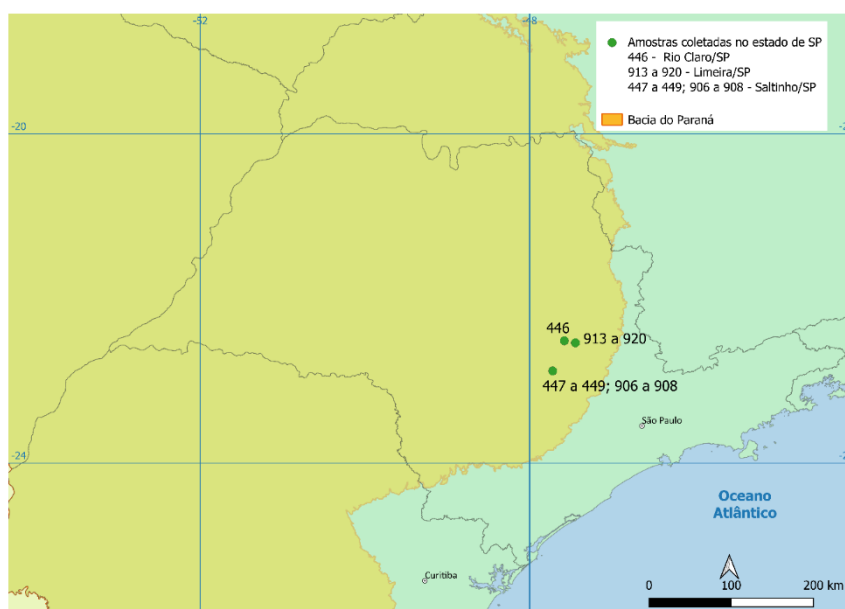
Através de visitas de campo, foi possível observar a diversidade de amostras de rochas coletadas em diferentes localidades da Formação Irati. A cidade de Rio Claro (SP) apresentou amostras de folhelho carbonático e folhelho silicático coletadas em afloramentos como Partecal-Partezani e Irati (topo), respectivamente. Já em Saltinho (SP), foram encontradas amostras de folhelho silicático provenientes da mineração Bernardino. Na cidade de Amaral Machado, também em SP, foram coletadas amostras de folhelho silicático em diferentes afloramentos, denominados AMM-01-01, AMM-01-02 e AMM-01-03. Em Limeira (SP), as amostras foram coletadas em diferentes pontos do Calcário Cruzeiro, onde foram encontrados folhelho silicático, folhelho dolomítico e folhelho carbonático. Em São Mateus do Sul (PR), foram coletadas amostras de folhelho silicático e dolomito em diferentes afloramentos próximos à Petrosix, provenientes de camadas do Irati (médio a inferior), Irati (topo) e Serra Alta (base). Por

fim, em Coluna White (SC), foram encontradas amostras de folhelho silicático coletadas em um afloramento próximo à região conhecida como Irati (topo).

4.1 Resultados advindos do estado de São Paulo

No estado de São Paulo foram obtidas quinze amostras, as quais foram recolhidas em três áreas de extração distintas, localizadas nos municípios de Rio Claro, Limeira e Saltinho. Essa distribuição geográfica está ilustrada no mapa presente na Figura XX. Dentre as quinze amostras, onze foram obtidas durante as atividades de pesquisa realizadas e as outras quatro foram disponibilizadas pela Rede Gasbras.

Figura XX – Mapa com a distribuição das amostras coletadas no estado de SP

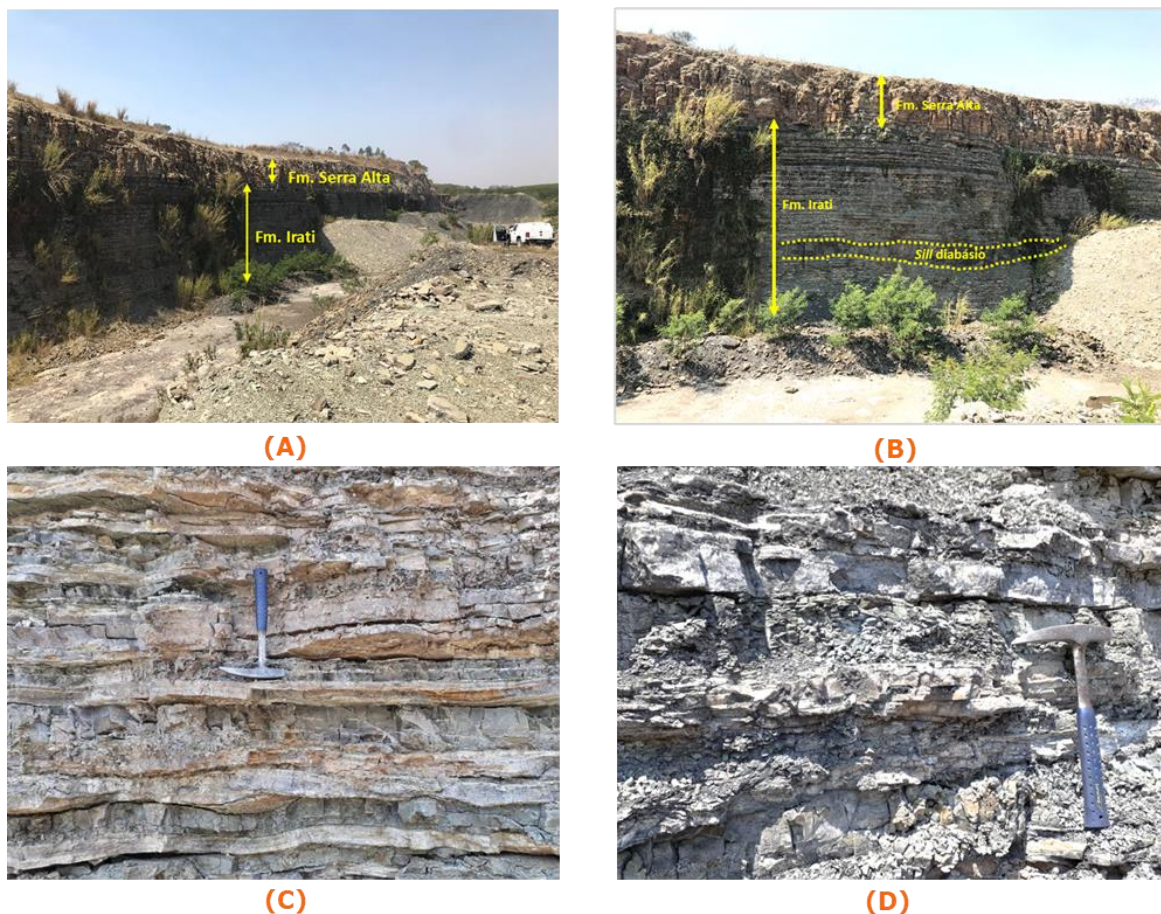


Fonte: Construído pelo autor a partir de CPRM (2016) e Zalán et al. (1990).

4.1.1 Amostras coletadas na Mineração Partecal-Partezani (Rio Claro/SP) e Bernardino (Saltinho/SP)

Em Rio Claro/SP, na Mineração Partecal-Partezani Calcários, notou-se o contato entre as Formações Serra Alta e Irati e o Membro Assistência durante trabalho de campo (Figura 30A). O sill de diabásio intercala-se na Fm. Irati e acompanha lateralmente as rochas por pelo menos 150 m (Figura 30B). A porção do Membro Assistência apresenta espessura de 15 m e se estende por pelo menos 150 m (Figura 30B). A alternância entre rochas carbonáticas e folhelho ocorre em camadas centimétricas (Figura 30C e D).

Figura XX – (A) Vista do afloramento do Membro Assistência da Fm. Irati e o contato entre as Formações Irati e Serra Alta; (B) Detalhe do sill de diabásio intercalado no Membro Assistência da Formação Irati; (C) Detalhe da alternância entre rocha carbonática e o folhelho; (D) Alternância entre dolomito e folhelho

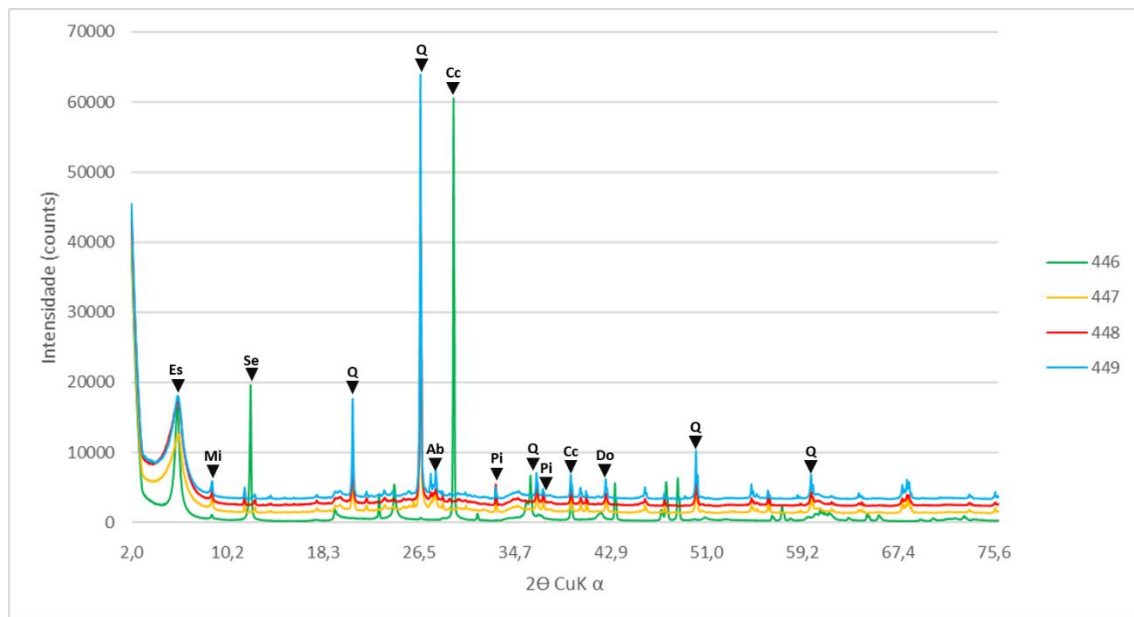


Fonte: Fotos tiradas pelo autor em visita às frentes de lavra da empresa Mineração Partecal em Rio Claro/SP.

Considerando que a frente de mineração observada para a Fm. Irati estava inativa, foi decidido usar a amostra 446, coletada anteriormente pela equipe do Projeto Rede GASBRAS enquanto a frente estava ativa, para garantir a qualidade do material. Essa amostra, juntamente com outras três (447, 448 e 449) também coletadas pela equipe da Rede Gasbras na Mineração Bernardino em Saltinho (SP), gerou os difratogramas de raios X apresentados nas Figuras 31 a 34. A análise dos gráficos mostra que a amostra 446 é diferente das outras por conter calcita e serpentina, enquanto as amostras 447, 448 e 449 têm uma intensidade maior de picos de quartzo. Essa distinção permitiu refinar a descrição litológica dos folhelhos amostrados, reconhecendo que o Membro Assistência contém folhelho carbonático e silicático (Tabela 8). Os difratogramas de raios X da fração argila ($<2\mu\text{m}$) confirmaram a

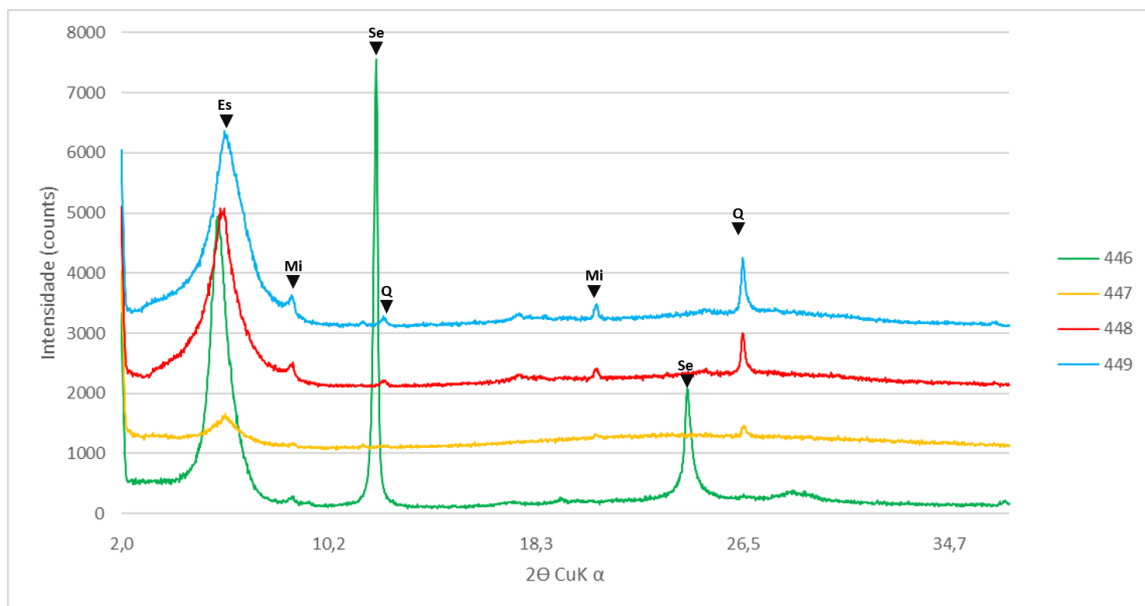
presença de filossilicatos, que se distribuem de forma diferenciada entre as amostras de folhelho. A amostra 446 contém esmectita e serpentina, enquanto as amostras 447, 448 e 449 contêm corrensita, mica e caulinita.

Figura 1 – Difratomogramas de raios X de amostra total das amostras 446 a 449 (Es – esmectita, Mi – mica, Se – serpentina, Q – quartzo, Ab – albita, Cc – calcita, Pi – pirita, Do – dolomita)



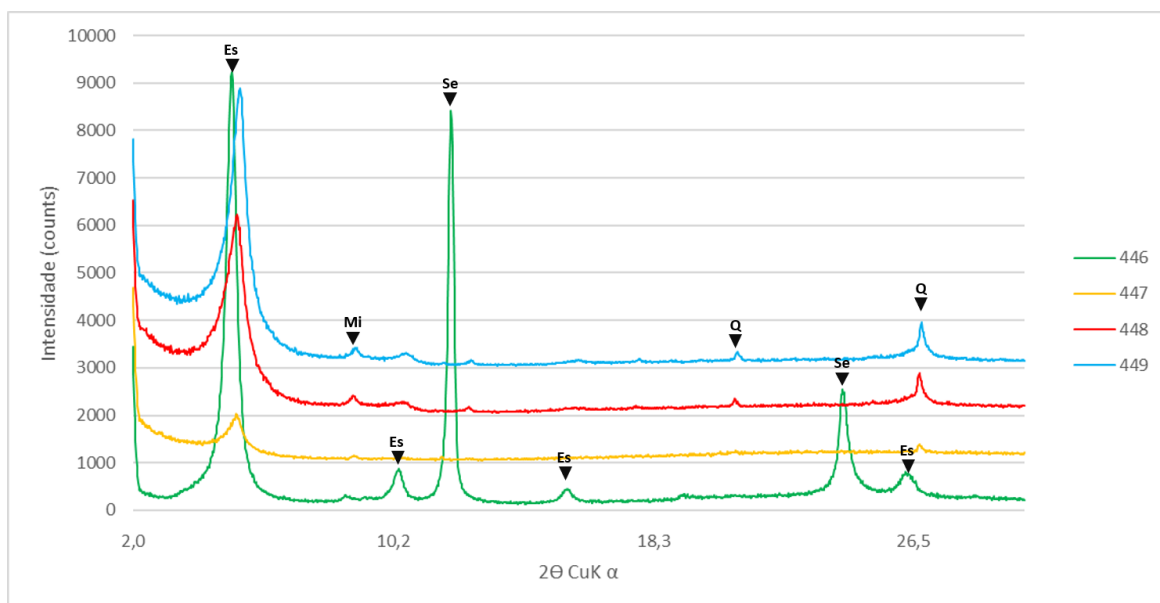
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 2 – Difratomogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 446 a 449 (Es – esmectita, Mi – mica, Se – serpentina, Q – quartzo)



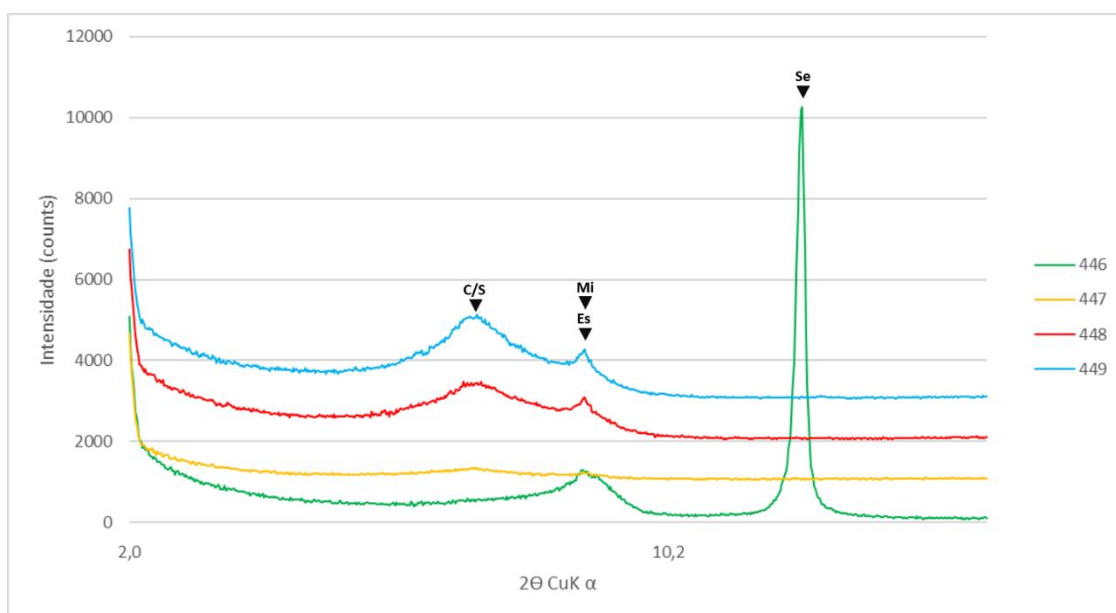
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3 – Difratomogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 446 a 449 (Es – esmectita, Mi – mica, Se – serpentina, Q – quartzo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4 – Difratomogramas de raios X da fração argila calcinada das amostras 446 a 449 (C/S – corrensite, Mi – mica, Es – esmectita, Se – serpentina)



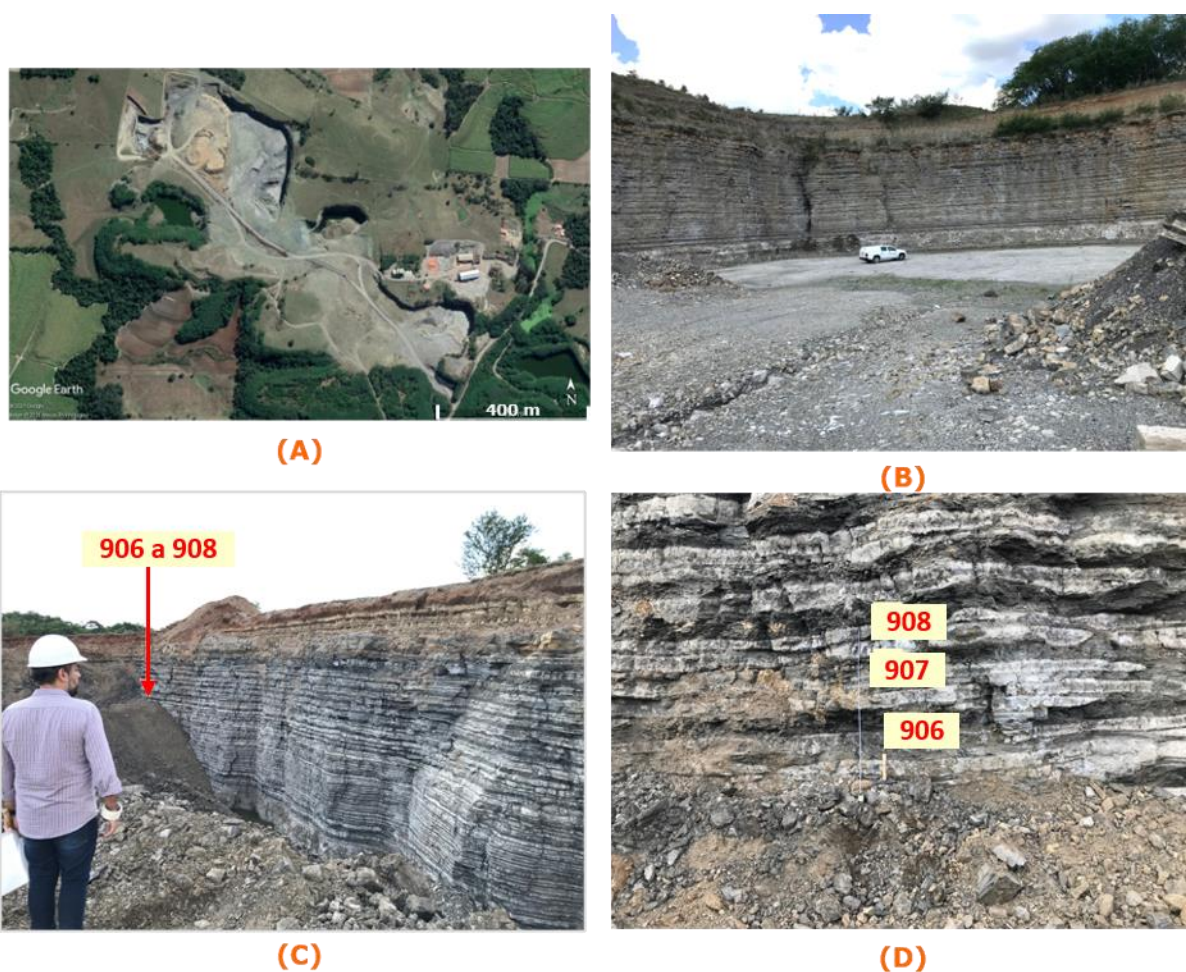
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Amostras coletadas em Saltinho (SP)

O trabalho de campo foi realizado em outra área de mineração em Saltinho/SP, na empresa Amaral Machado Mineração, para ampliar a observação do Membro Assistência e o acervo de amostras em São Paulo. Nesse local, foi observado o contato

geológico entre as Formações Irati e Serra Alta, bem como a regularidade da intercalação das camadas de folhelho (cor cinza escuro) e rocha carbonática (cor cinza claro) (Figura 35 B e C). Essas camadas compõem um pacote sedimentar com espessura mínima de 15 m e continuidade lateral mínima de 1100 m.

Figura 5 – (A) Imagem aérea da Mineração Amaral Machado em Saltinho/SP; (B) Visão da frente de lavra inativa no Membro Assistência da Formação Irati; (C) Visão da frente de lavra ativa no Membro Assistência da Formação Irati, onde foram coletadas as amostras AMM-01 – 01, 02 e 03; (D) Detalhe da alternância das camadas de folhelho e rocha carbonática e posição de coleta das amostras de folhelho

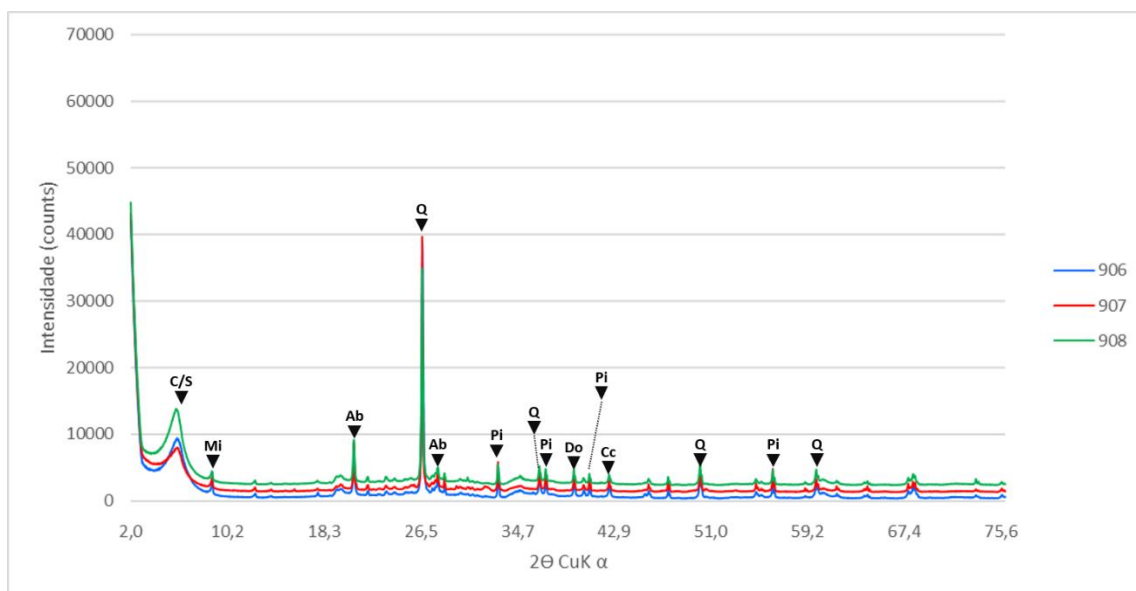


Fonte: (A) Imagem obtida pelo autor através do Google Earth. (B, C e D) Do acervo do autor.

Foram coletadas e analisadas três amostras (906 a 908) neste local. Os difratogramas das amostras mostram uma similaridade significativa, com pouca variação na intensidade dos picos. Os minerais identificados incluem corrensitita, mica, albita, quartzo e pirita ($d=2.701\text{\AA}$), como pode ser visto nas Figuras 36 a 39 e na Tabela 7. A presença de quartzo e a ausência de carbonatos nos difratogramas indicam que

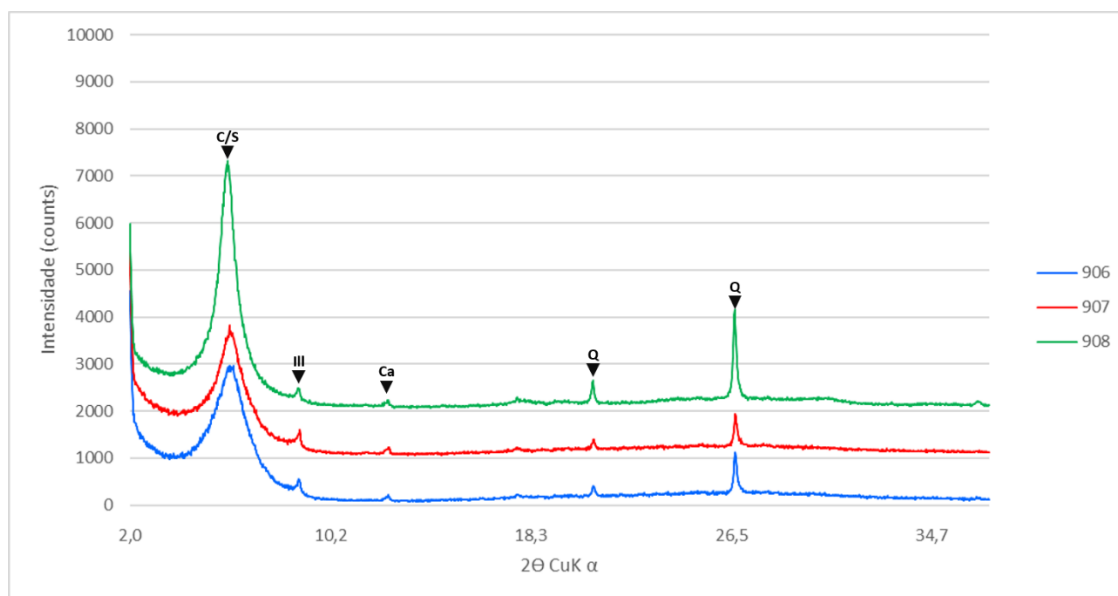
essas amostras são folhelhos silicáticos (Tabela 8). A análise da fração argila também revelou a presença de illita e caulinita nas três amostras, bem como argilomineral interestratificado irregular de clorita/esmectita na amostra 907. A illita foi identificada pela reflexão basal $d=9.9\text{\AA}$ nos difratogramas da fração argila, enquanto a caulinita foi identificada pela reflexão $d=7.1$ a 7.2\AA nos difratogramas da argila seca ao ar, com diminuição da intensidade após calcinação. O argilomineral interestratificado irregular de clorita/esmectita foi caracterizado pela pequena expansão da reflexão $d=14\text{\AA}$ no difratograma da amostra seca ao ar, para $d=15$ a 16\AA após solvatação, e retorno ao valor original após calcinação.

Figura 6 – Difratogramas de raios X de amostra total das amostras 906 a 908 (C/S – corrensitita, Mi – mica, Al – albita, Q – quartzo, Pi – pirita, Do – dolomita, Cc – calcita)



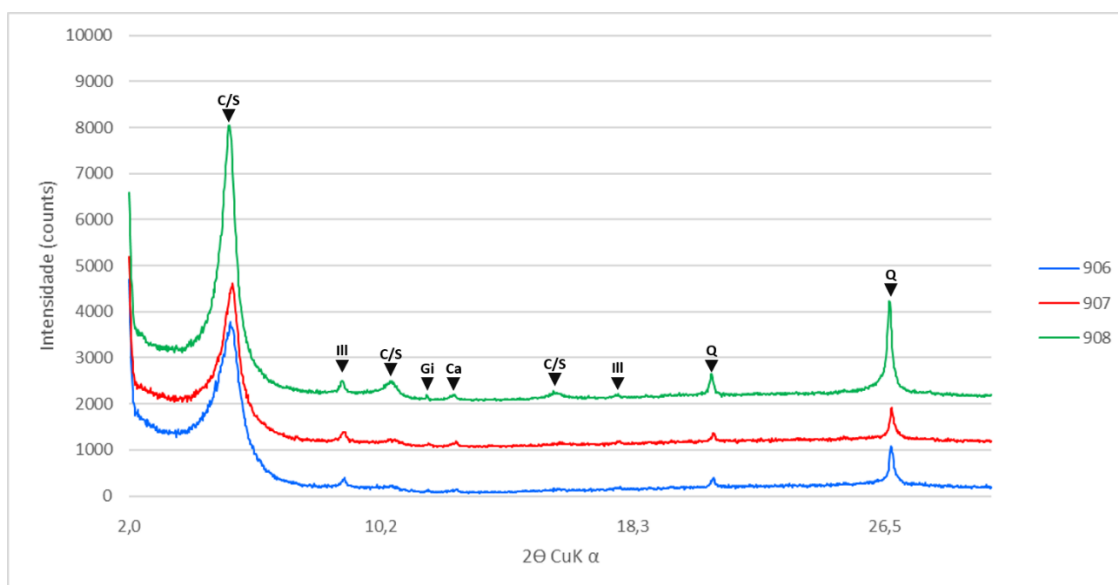
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 7 – Difrátogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 906 a 908 (C/S – corrensite, Ill – illita, Ca – caulinita, Q – quartzo)



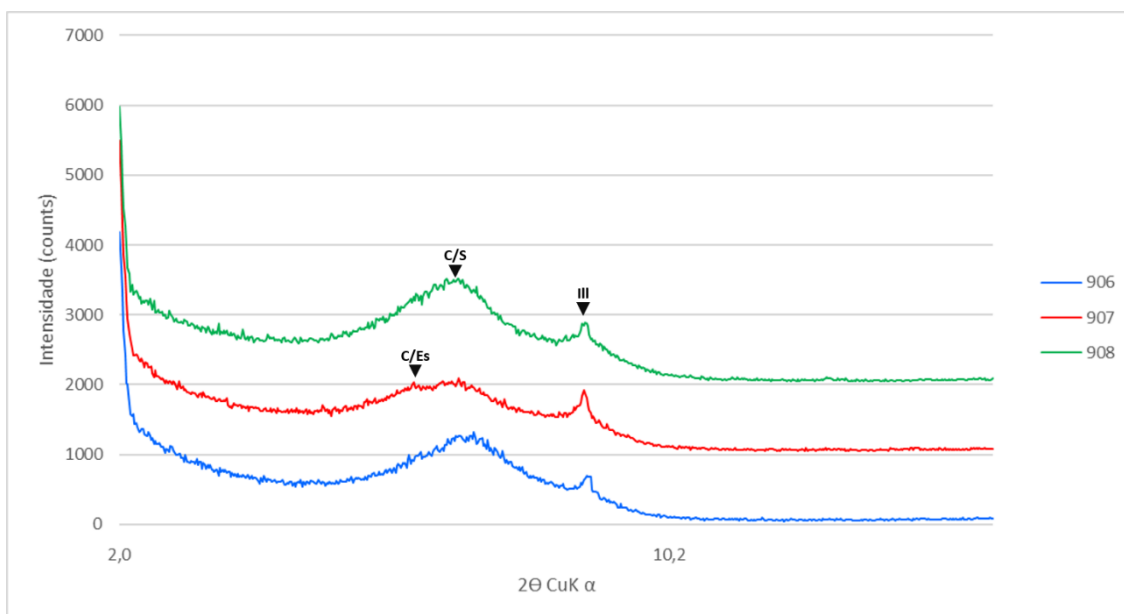
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Difrátogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 906 a 908 (C/S – corrensite, Ill – illita, Gi – gipsita, Ca – caulinita, Q – quartzo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Difratomogramas de raios X da fração argila calcinada das amostras 906 a 908 (C/S – corrensite, Ill – illita)

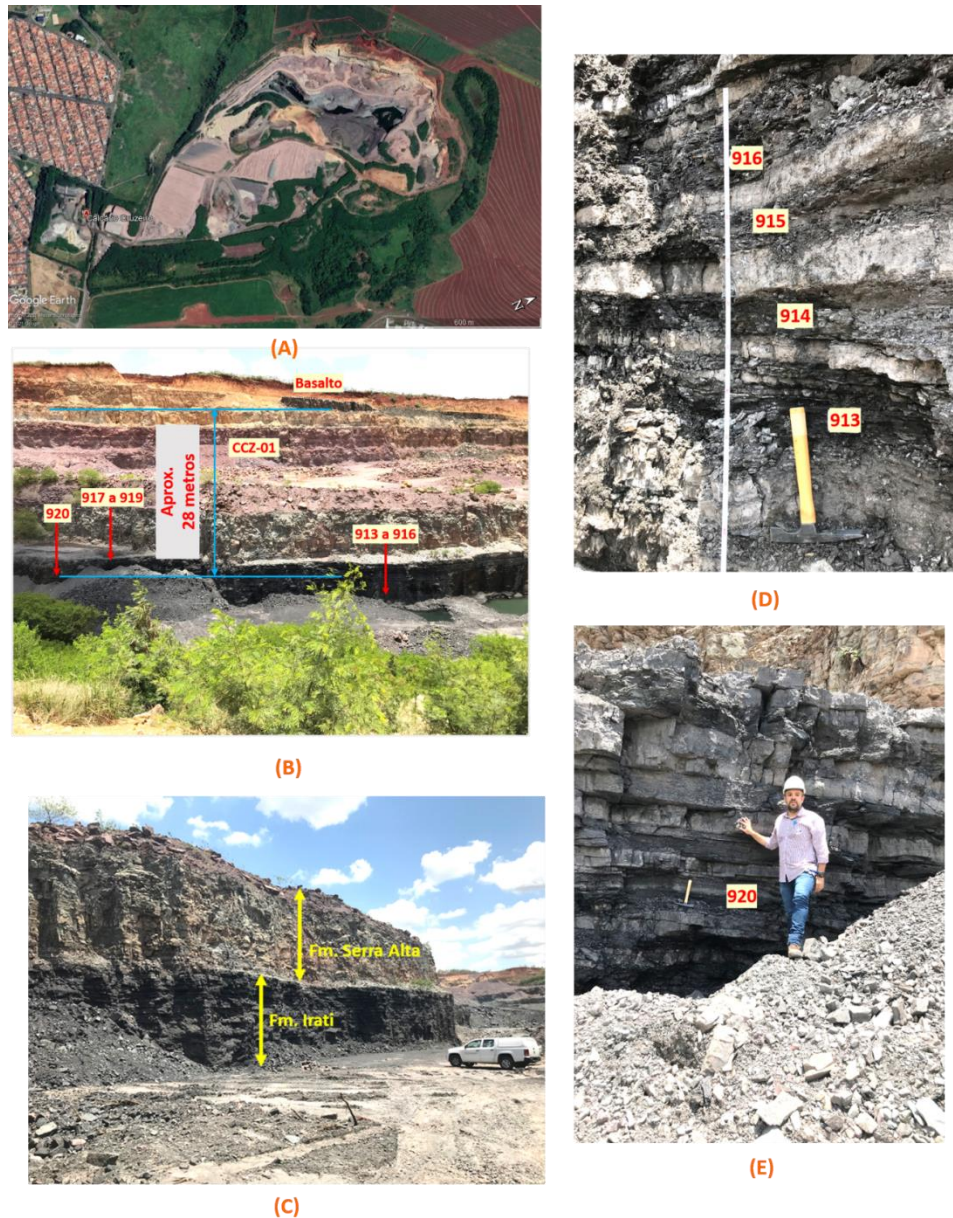


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Amostras coletadas em Limeira (SP)

Em outra frente de lavra localizada em Limeira, SP, na área da empresa Calcário Cruzeiro (Figura 40A e B), ocorreu uma terceira visita. Foi observado novamente o contato entre as Formações Irati e Serra Alta, sendo que a Fm. Irati tem uma espessura aproximada de 6 m e continuidade lateral de pelo menos 1300 m (Figura 40A, B e C). Na mesma frente de lavra, é possível notar um distanciamento de cerca de 28 m entre o topo da camada de folhelho e a base de uma ocorrência de rocha vulcânica (possivelmente basalto) na superfície, conforme Figura 40B.

Figura 10 – (A) Imagem aérea da lavra da empresa Calcário Cruzeiro em Limeira/SP; (B) Visão geral da frente de lavra ativa (parte inferior da foto) com indicação dos locais de coleta de amostras, e contato com rocha vulcânica no topo; (C) Visão geral da exposição do Membro Assistência da Fm. Irati, bem como contato entre as Formações Irati e Serra Alta; (D) e (E) Detalhe da alternância de camadas de folhelho e rocha carbonática e locais de coleta das amostras CRUZ01 a CRUZ08



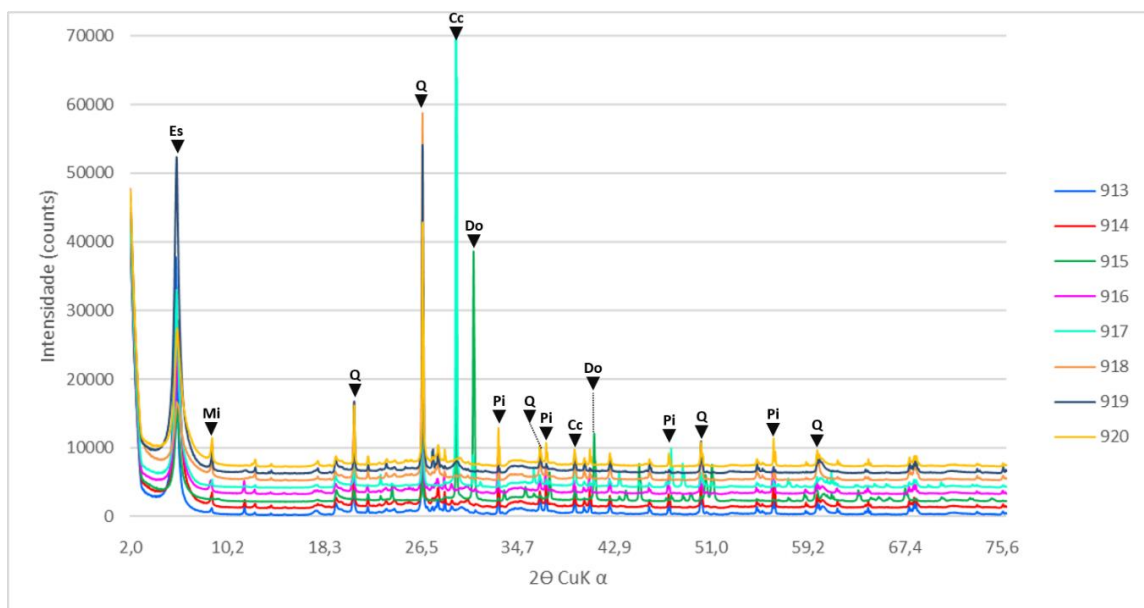
Fonte: (A) Imagem obtida pelo autor através do Google Earth. (B, C, D e E) Do acervo do autor.

Na frente de lavra dessa empresa, foram coletadas oito amostras (913 a 920) (Tabela 7; Figura 40 B, D e E), que foram submetidas aos ensaios de difração de raios X de amostra total, conforme Figura 41. A mineralogia do local é diversificada. Nas amostras da base (913) ao topo (920), observa-se a presença de folhelho com

mineralogia silicática composta por quartzo, feldspato (provavelmente albita), esmectita e mica, como visto nas amostras 913, 914, 916, 918, 919 e 920, e folhelho com mineralogia carbonática (amostras 915 e 917) contendo calcita, dolomita, esmectita e quartzo.

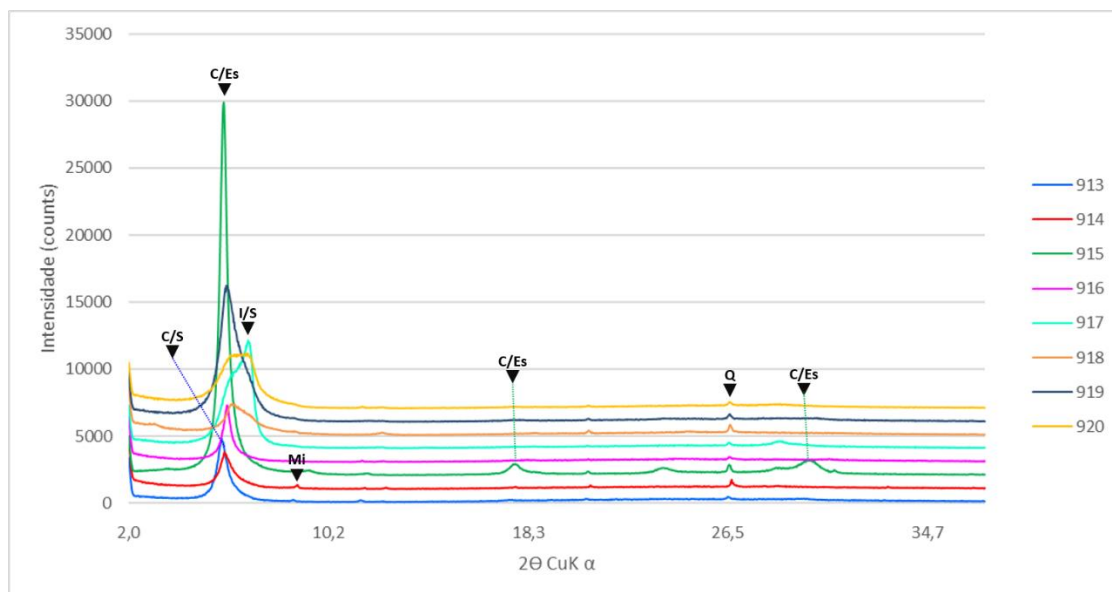
As análises da fração argila (Figura 42, Figura 43 e Figura 44) comprovaram a presença de corrensite nas amostras 913, 914, 916, 918 e 920, além de esmectita na amostra 919, argilomineral interestratificado desordenado clorita/esmectita e illita/esmectita nas amostras 917 e 918, mica em todas as amostras, exceto na 917, e caulinita na maioria das amostras. Os critérios de identificação desses argilominerais, a partir das reflexões nos difratogramas da fração argila, foram os mesmos apresentados nos itens anteriores.

Figura 11 – Difratogramas de raios x de amostra total das amostras 913 a 920 (Es – esmectita, Mi – mica, Q – quartzo, Cc – calcita, Do – dolomita, Pi – pirita)



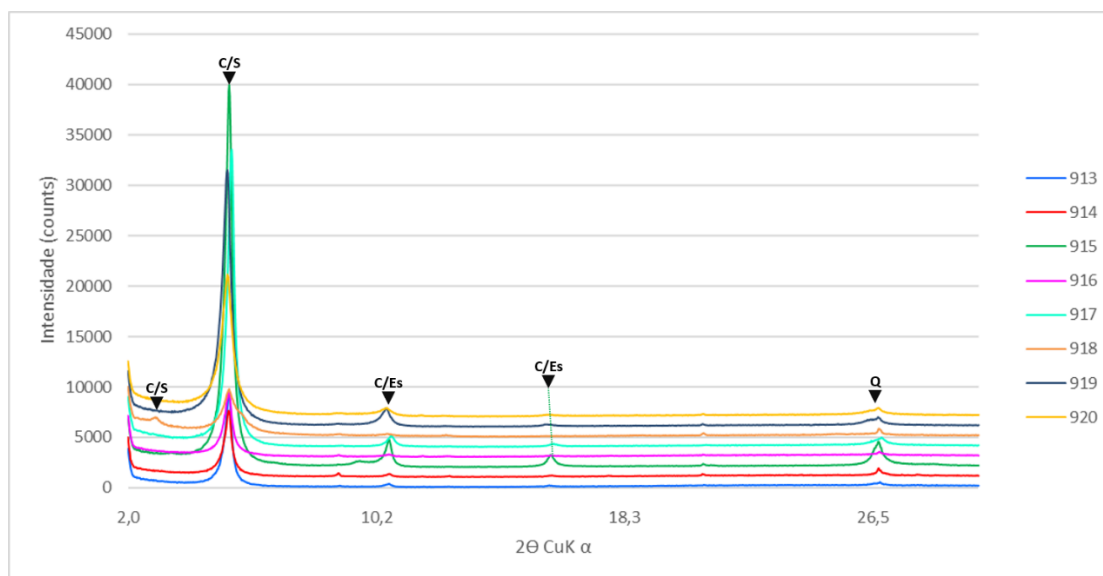
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Difratogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 913 a 920 (C/S – corrensitita, C/Es – argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita, Mi – mica, Q – quartzo)



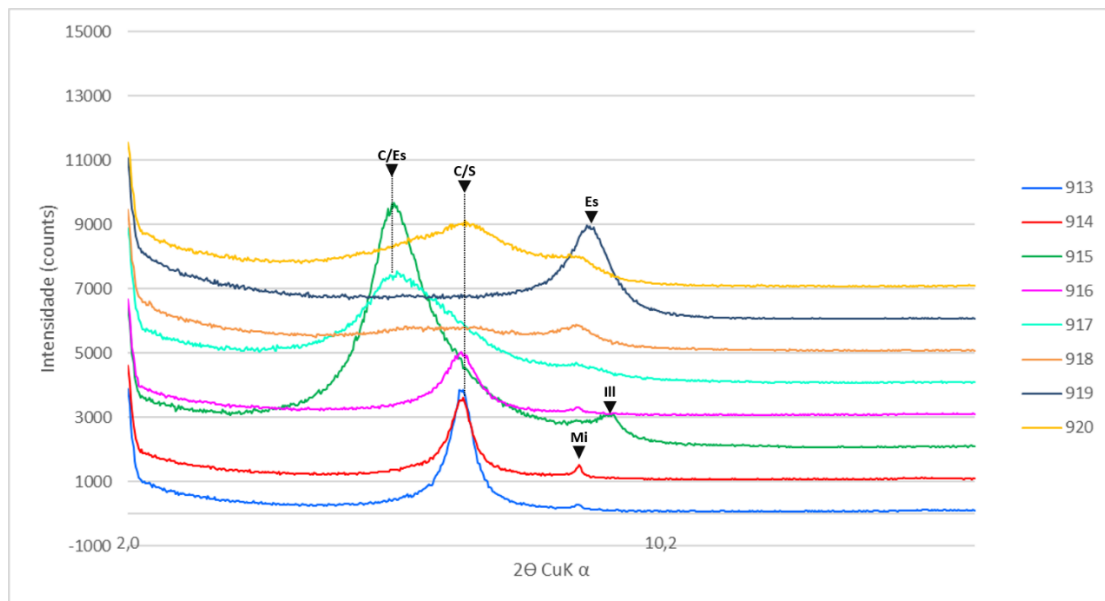
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Difratogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 913 a 920 (C/S – corrensitita; C/Es – argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita, Q - quartzo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Difrátogramas de raios X da fração argila calcinada das amostras 913 a 920 (C/Es – argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita, C/S – corrensitita, Mi – mica, Es – esmectita, Ill – illita)

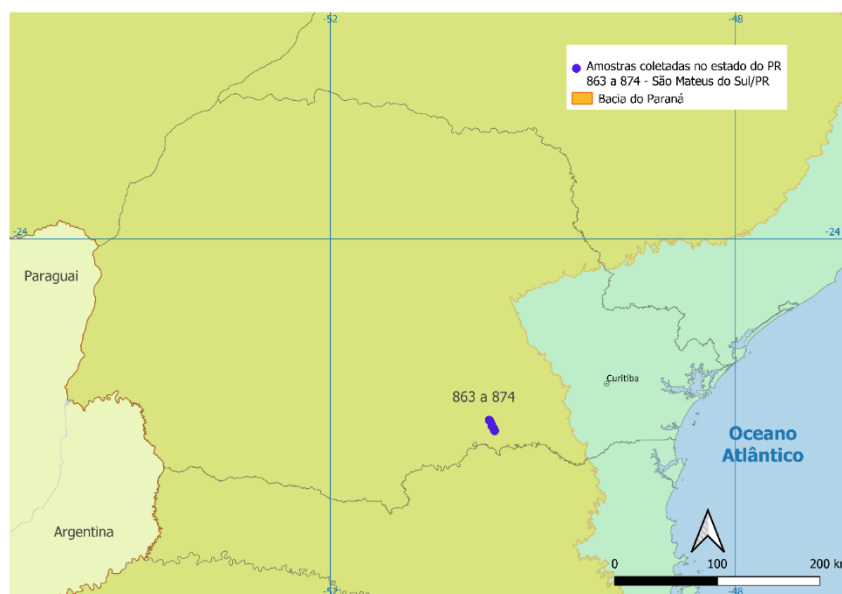


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Resultados das amostras advindas do estado do Paraná

No estado do Paraná, foram amostrados seis afloramentos próximos à área da Petrobrás em São Mateus do Sul, onde os folhelhos betuminosos do Membro Assistência são submetidos ao processo Petrosix para produção de óleo e gás (MILANI; ARAÚJO, 2003) (Figura 45). Foram coletadas um total de doze amostras, sendo oito do Membro Assistência e quatro da base da Formação Serra Alta. Das oito amostras do Membro Assistência, quatro são de folhelho, uma de folhelho intercalado com dolomito e três de dolomito. As Figura 46 A e B mostram o local da coleta, e os difratogramas relacionados às amostras são apresentados nas Figura 47 a 50.

Figura 15 – Mapa com a distribuição das amostras coletadas no estado de PR próximos a unidade Petrosix da Petrobras



Fonte: Construído pelo autor a partir de CPRM (2016) e Zalán et al. (1990).

Os folhelhos do Membro Assistência apresentam quartzo em todas as amostras analisadas, e albita nas amostras 863, 866, 868, 870 e 871. Pirita foi encontrada nas amostras 863, 868 e 870, e gipsita nas amostras 863, 866, 870 e 871. A dolomita é o único carbonato encontrado, ocorrendo nas amostras 866, 870 e 871. Os filossilicatos estão distribuídos de forma variada, com presença de esmectita, clorita, illita e caulinita. Diferentemente dos folhelhos do Membro Assistência no estado de São Paulo, as amostras analisadas no estado do Paraná não apresentaram mica, sendo a illita o filossilicato predominante na maioria das amostras. Esmectita e interestratificado illita/esmectita foram encontrados em poucas amostras de folhelho.

As três amostras de dolomito da Formação Irati contêm, além de dolomita, quartzo (presente em três amostras), albita (na amostra 869) e argilominerais, como esmectita (na amostra 864), argilomineral interestratificado illita-esmectita (na amostra 867), clorita (na amostra 869) e caulinita (nas amostras 867 e 869).

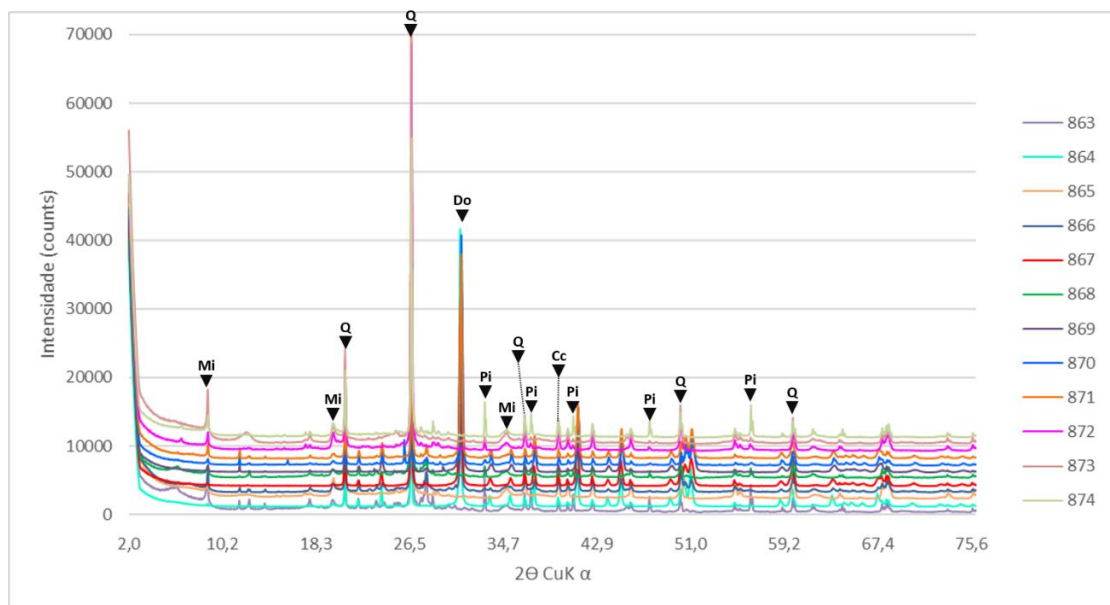
Os folhelhos da Formação Serra Alta, sobrepostos à Formação Irati nos locais de coleta no estado do Paraná, apresentam quartzo e, em sua maioria, albita, clorita e illita.

Figura 16 – Local da coleta de amostras da Fm. Irati nas proximidades da Petrosix em São Mateus do Sul/PR



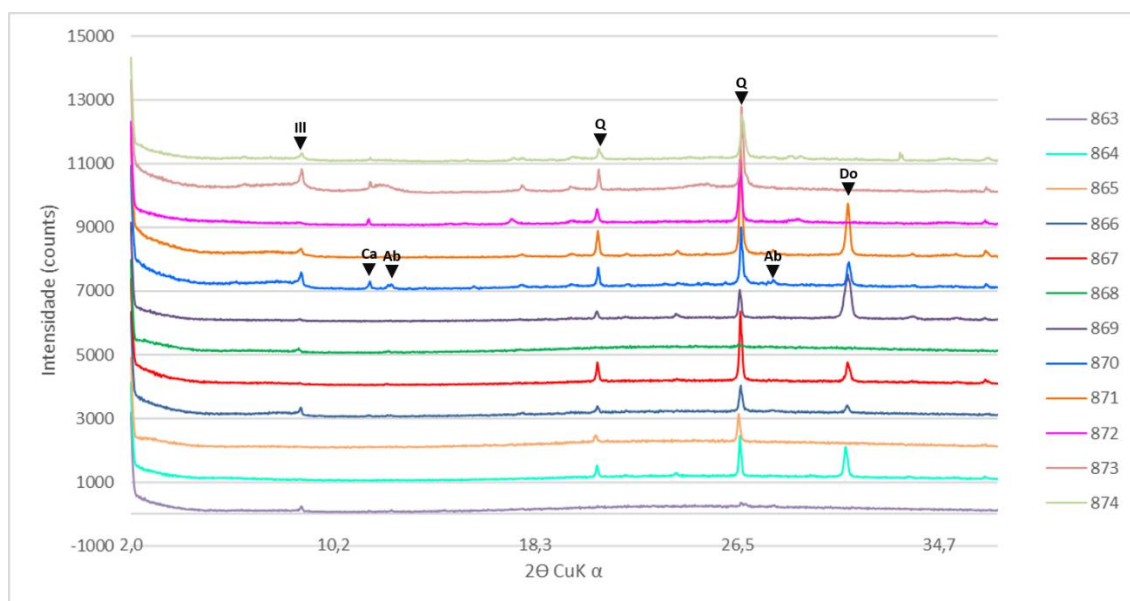
Fonte: Fotos cedidas pelos pesquisadores da Rede Gasbras.

Figura 17 – Difratogramas de raios X de amostra total das amostras 863 a 874
(Mi – mica, Q – quartzo, Do – dolomita, Pi – pirita, Cc – calcita)



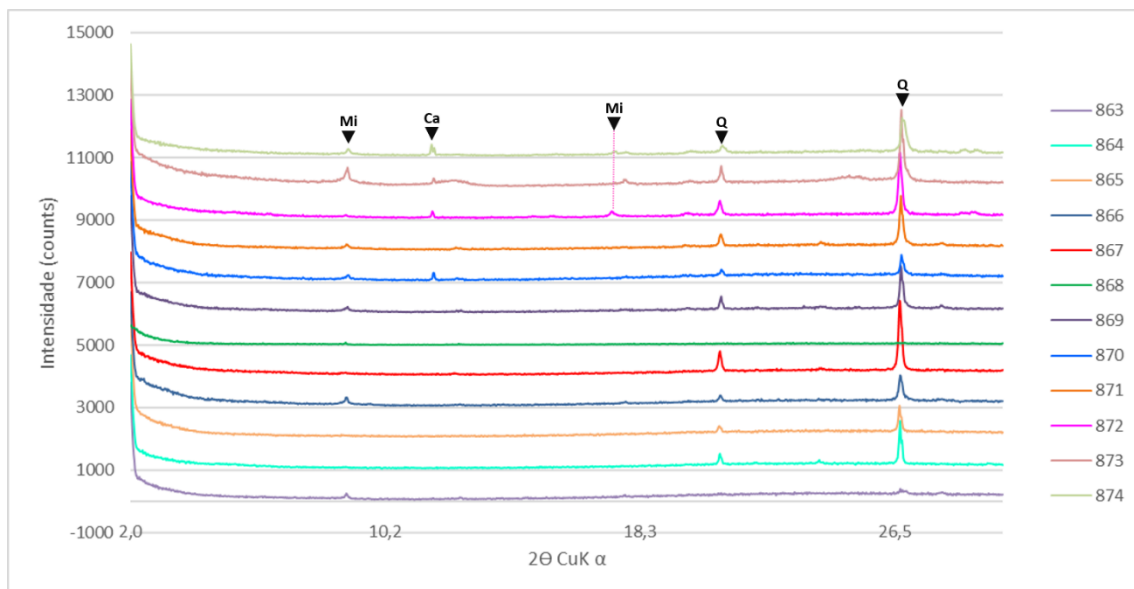
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Difrátogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 863 a 874 (Ill – illita, Ca – caulinita, Ab – albita, Q – quartzo, Do – dolomita)



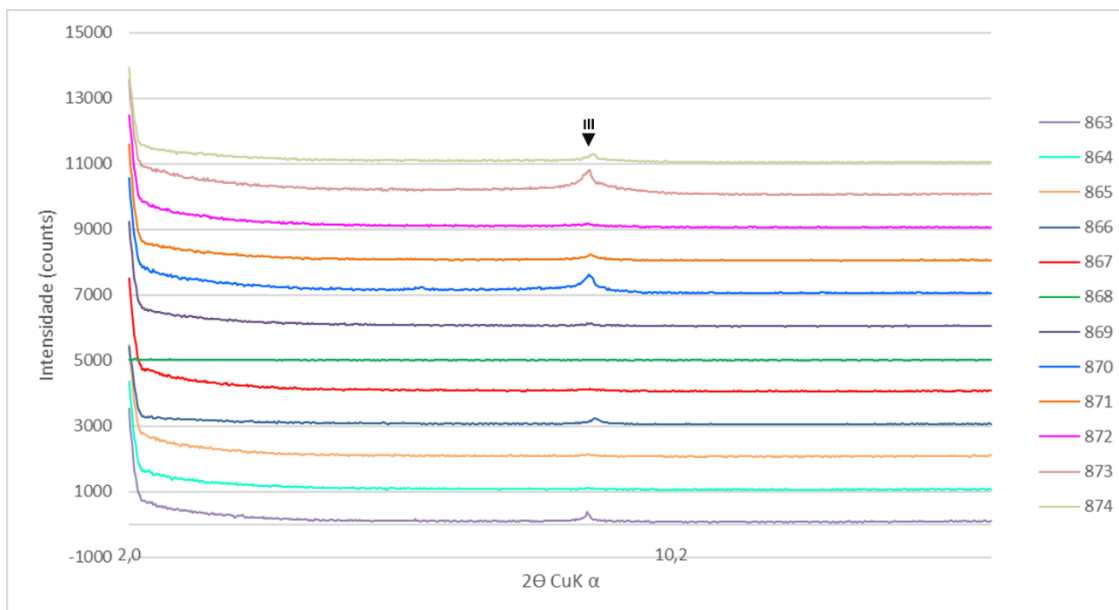
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Difrátogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 863 a 874 (Mi – mica, Ca – caulinita, Q – quartzo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Difratomogramas de fração argila calcinada das amostras 863 a 874 (Ill – illita)

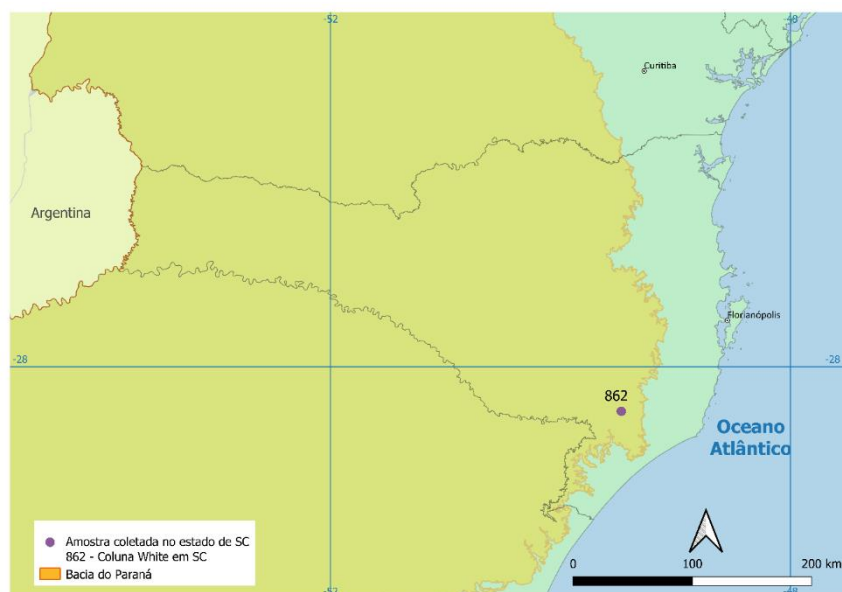


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Resultados da amostra da Coluna White no estado de Santa Catarina

Foi coletada ainda, uma amostra de folhelho do topo da Fm. Irati em Santa Catarina (Figura 51), na região da Serra do Rio do Rastro, parte da Coluna White, uma coluna estratigráfica elaborada do Gondwana mundial (ORLANDI FILHO, et al., 2006). A Figura 52 mostra a localização aproximada da coleta, e a Figura 53 apresenta o difratograma de raios X relacionado à amostra 862. A mineralogia dessa amostra de folhelho é composta principalmente por quartzo, feldspato (provavelmente albita) e pirita, além de filossilicatos como mica, illita e argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita.

Figura 21 – Mapa com a localização do afloramento amostrado na Coluna White/SC



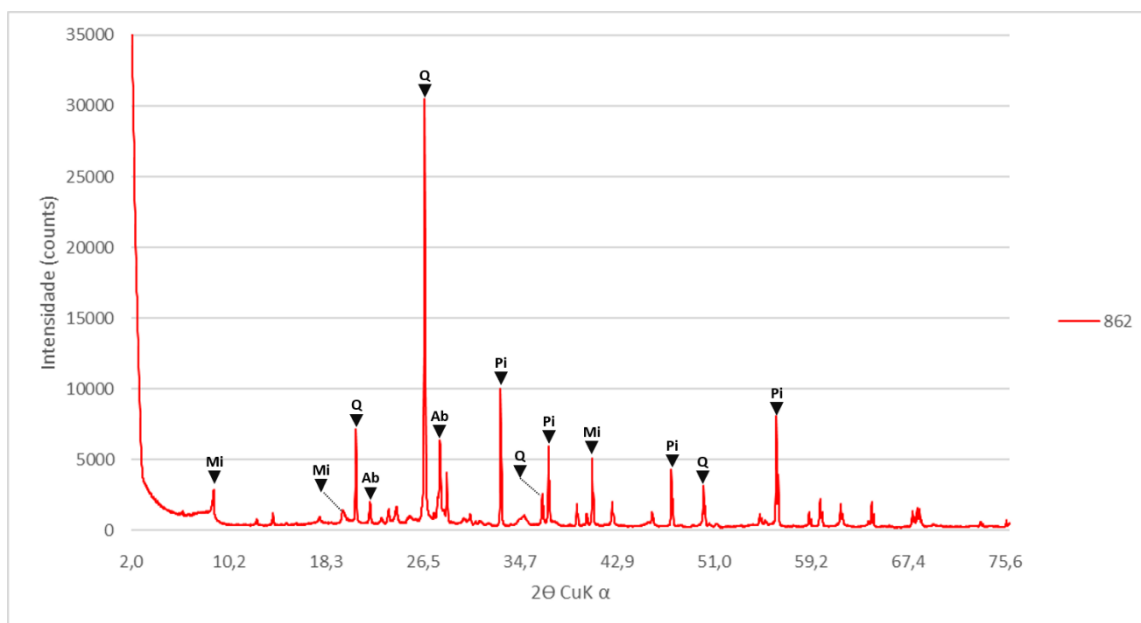
Fonte: Construído pelo autor a partir de CPRM (2016) e Zalán et al. (1990).

Figura 22 – Local de coleta (marcador azul) de amostra no topo da Formação Irati na Coluna White/SC (coordenadas 49°28'16,84"O; 28°23'14,87"S)



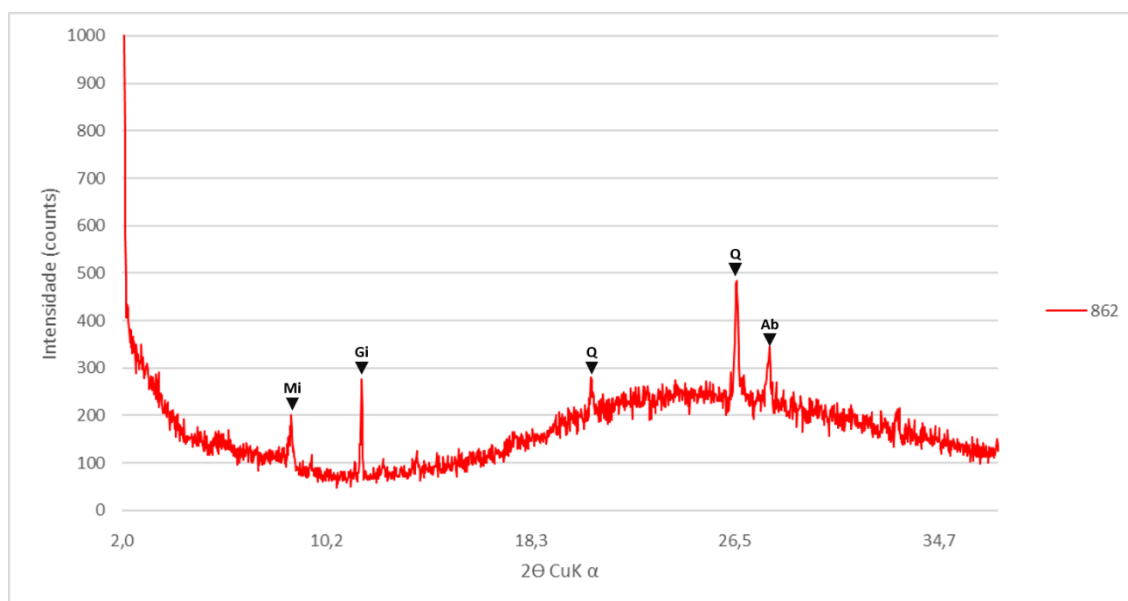
Fonte: Imagem obtida pelo autor através do Google Earth.

Figura 23 – Difratoograma de raios X de amostra total da amostra 862 (Mi – mica, Q – quartzo, Ab – albita, Pi – pirita)



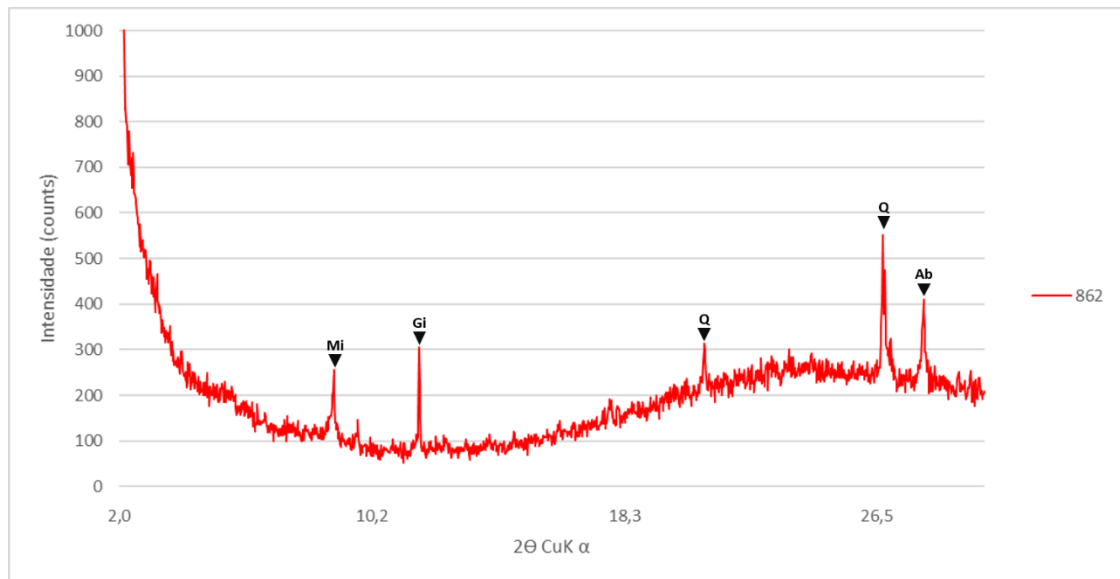
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24 – Difratoograma de raios X de fração argila seca ao ar da amostra 862 (Mi – mica, Gi – gipsita, Q – quartzo, Ab – albita)



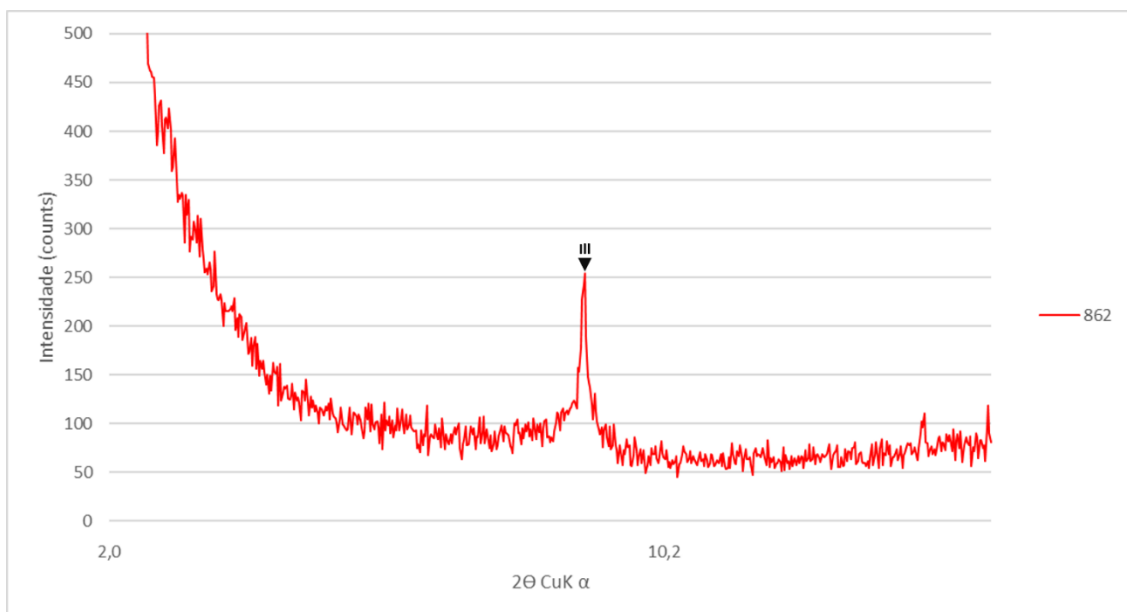
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Difratoograma de raios X de fração argila solvatada com etilenoglicol da amostra 862 (Mi – mica, Gi – gipsita, Q – quartzo, Ab – albita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Difratoograma de fração argila calcinada da amostra 862 (Ill – ilita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Análise semiquantitativa de minerais presentes nas amostras analisadas

Os dados foram analisados de forma semiquantitativa pelo método RIR (Reference Intensity Ratio) para identificar a composição mineralógica dos folhelhos da Fm. Irati, com base na medição das áreas de picos selecionados para cada fase mineral ponderadas por fatores de referência de intensidade, de acordo com o método de RIR

(HILLIER, 1999). Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 9, com as proporções em porcentagem de carbonatos (calcita e dolomita), quartzo, feldspatos e filossilicatos. A composição mineralógica média dos folhelhos do Mb. Assistência é de 15,4% de carbonato, 48,8% de quartzo e feldspato, e 35,7% de filossilicatos. Os dolomitos desse membro possuem uma proporção média de 70,2% de carbonato, 22% de quartzo e feldspato, e 7,8% de filossilicatos, enquanto o folhelho da Fm. Serra Alta possui 59,4% de quartzo e feldspato, e 40,6% de filossilicatos.

Esses resultados também permitiram a elaboração de um diagrama ternário (Figura 57) que inclui as três amostras de dolomito (864, 867 e 869), uma vez que a caracterização mineralógica via difração de raios X identificou a presença de quartzo e argilominerais, e ainda feldspato na amostra 869. Essa composição mineralógica é semelhante àquela identificada em grande parte das amostras de folhelho analisadas em vários estados. Além disso, a intercalação de folhelho e rocha carbonática, característica do Membro Assistência, como observado em frentes de lavra em São Paulo e afloramentos no Paraná, implica em uma análise conjunta dessas litologias em relação à sua fracabilidade.

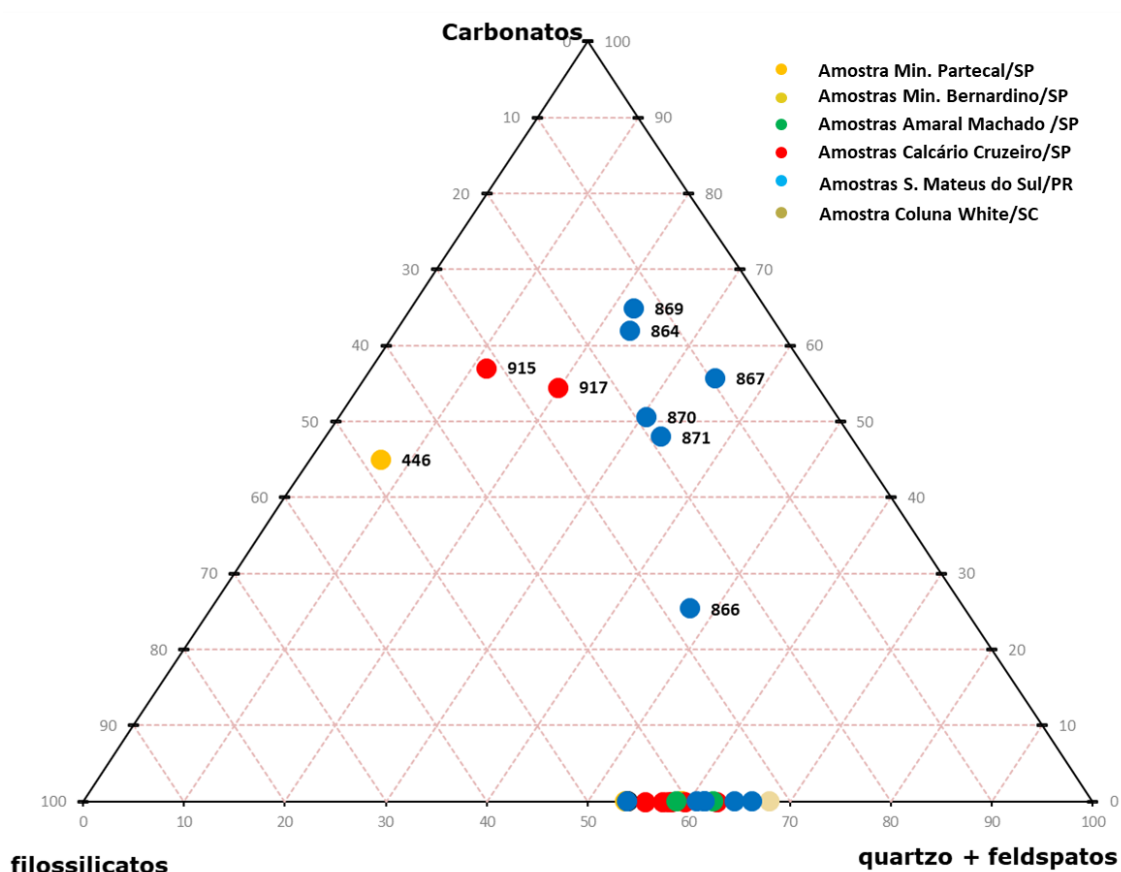
Tabela 1 – Composição mineralógica das amostras coletadas (em %)

local	amostra	carbonatos (%)	quartzo + feld (%)	filossilicatos (%)
Rio Claro/SP	446	51,9	3,5	44,5
Saltinho/SP	447	0,0	59,2	40,8
	448	0,0	59,4	40,6
	449	0,0	67,9	32,1
	906	0,0	55,7	44,3
	907	0,0	57,4	42,6
	908	0,0	58,8	41,2
Limeira/SP	913	0,0	53,7	46,3
	914	0,0	54,0	46,0
	915	65,9	7,0	27,1
	916	0,0	58,0	42,0
	917	62,9	15,6	21,5
	918	0,0	62,8	37,2
	919	0,0	59,6	40,4
	920	0,0	58,2	41,8
São Mateus do Sul/PR	863	0,0	62,4	37,6
	864	71,5	18,4	10,1
	865	0,0	60,7	39,3

	866	29,3	45,5	25,2
	867	64,3	30,4	5,3
	868	0,0	64,5	35,5
	869	74,9	17,1	8,0
	870	58,4	26,6	15,0
	871	55,4	29,5	15,1
	872	0,0	61,6	38,4
	873	0,0	53,8	46,2
	874	0,0	61,6	38,4
Coluna White/SC	862	0,0	66,3	33,7
Média Folhelho Fm. Irati		15,4	48,8	35,7
Média Dolomito Irati		70,2	22	7,8
Média Folhelho Serra Alta		0	59,4	40,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Diagrama ternário com a representação da composição mineralógica das amostras analisadas



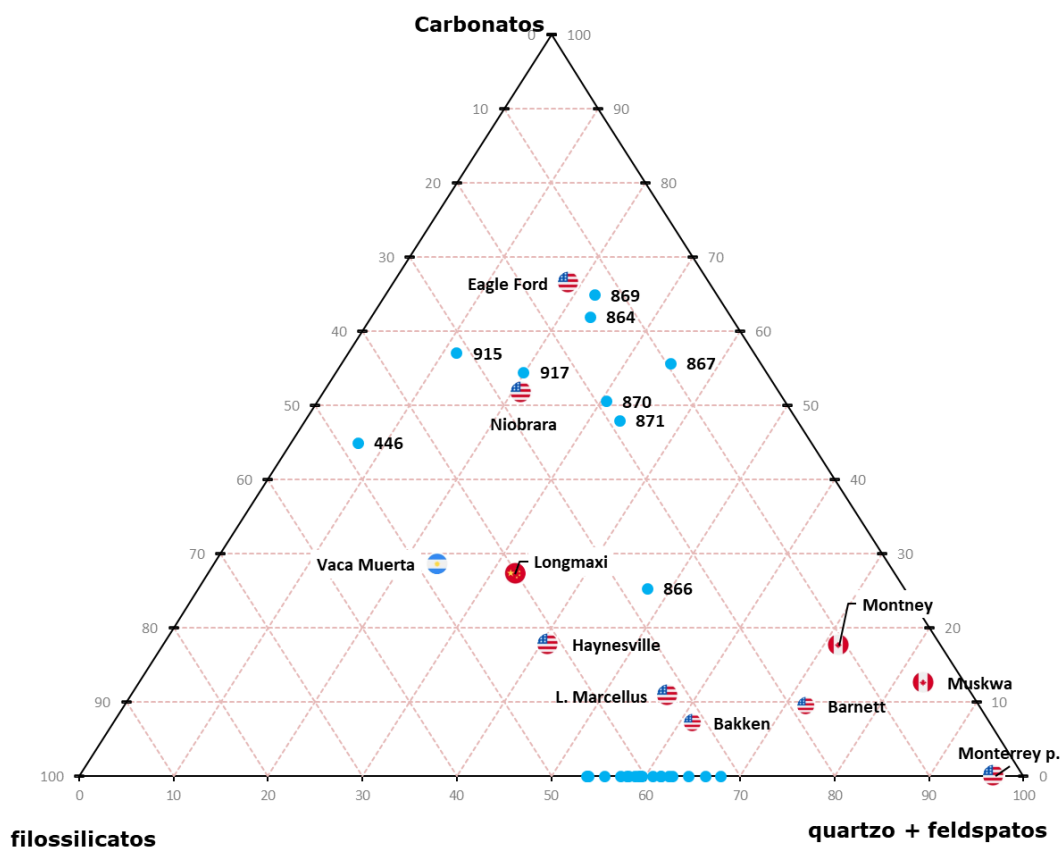
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o diagrama ternário, cerca de 70% das 28 amostras analisadas não possuem carbonatos. A amostra 446, coletada na Mineração Partecal, SP, tem baixo teor de quartzo. Duas amostras (915 e 917) da empresa Calcário Cruzeiro em Limeira/SP possuem alta presença de carbonatos (calcita e dolomita), e seis amostras de São Mateus do Sul/PR (representando 50% das amostras coletadas) têm distribuição equitativa, com menor contribuição de filossilicatos e maior de quartzo, feldspato e carbonatos.

4.5 Comparação das análises mineralógicas da Formação Irati com folhelhos já produtores no exterior

Os dados mineralógicos de folhelhos produtores de gás de outros países foram adicionados ao gráfico ternário da composição mineralógica do Membro Assistência, resultando na Figura 58. Observa-se que amostras de dolomito (864 e 869) da Fm. Irati têm composição semelhante aos folhelhos da Fm. Eagle Ford (Texas, EUA). As amostras de folhelho do Membro Assistência podem ter composição muito similar (amostra 917) ao folhelho da Fm. Niobrara (Colorado, EUA), ou serem um pouco mais (amostras 870 e 871) ou menos (amostra 915) quartzosas do que esse folhelho produtor de gás natural nos EUA. O folhelho da amostra 446, com menor proporção de quartzo, fica entre os folhelhos das formações Niobrara (EUA) e Vaca Muerta (Argentina) em termos de proporção de carbonatos e filossilicatos. O folhelho do Mb. Assistência proveniente de São Mateus do Sul/PR apresenta composição mineralógica semelhante aos folhelhos produtores das formações Longmaxi (China) e Haynesville (Texas, EUA). As demais amostras da Formação Irati analisadas e plotadas no gráfico da Figura 58 têm menor presença de carbonatos em comparação aos folhelhos produtores internacionais, embora tenham teores similares de quartzo, feldspato e filossilicatos aos folhelhos das formações Marcellus (Pensilvânia) e Bakken (Dakota do Norte), ambos nos EUA.

Figura 28 – Diagrama ternário comparativo entre as amostras analisadas (em azul) e as médias mineralógicas de campos (*plays*) de países produtores de gás de folhelho



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados próprios; Luo et al. (2020), Peters et al. (2016) e Sales e Sosa (2013).