

DESAFIOS DO KICK-OFF POINT NA FORMAÇÃO IRATI, BACIA DO PARANÁ¹

Fábio Palma de Lima²

Resumo:

O Brasil ocupa a décima posição entre os países com as maiores reservas mundiais de gás de folhelho. Este cenário geológico e, sobretudo, a premente necessidade de se aumentar a participação do gás natural na matriz energética brasileira, tornam necessária a pesquisa desse recurso energético não convencional. A fraqueza em relação à segurança energética também reforça essa necessidade, como ficou evidente durante a baixa pluviosidade registrada entre os anos de 2014/15, quando o país foi obrigado a acionar suas usinas termoeletricas em regimes quase que ininterruptos para garantir o fornecimento de eletricidade. Além disso, o gás natural apresenta vantagens ambientais e energéticas em comparação com outros combustíveis fósseis, o que o torna um componente importante para a tão almejada transição energética baseada em uma matriz mais sustentável.

No entanto, a produção brasileira atual de gás não atende à demanda existente, o que reforça a necessidade de explorar reservatórios não convencionais de gás natural, como o gás de folhelho.

Neste sentido, este artigo tem como objetivo pesquisar as perspectivas da produção de gás natural de folhelho na Formação Irati, Bacia do Paraná, utilizando a composição mineralógica qualitativa e quantitativa das rochas como critério norteador de análise, buscando elementos geológicos necessários para analisar a melhor forma de eleger o ponto para a manobra responsável pela transição entre a perfuração vertical e horizontal, denominado kick-off point,

Explorar as reservas de gás de folhelho no Brasil pode reduzir a dependência da importação deste combustível e fornecer uma fonte de energia mais limpa e eficiente.

Palavras-Chave:

Kick-off point, Shale Gas, gás natural não convencional, Bacia do Paraná, Formação Irati

¹ Artigo Técnico submetido à Universidade de São Paulo (USP) como parte da avaliação da disciplina EAH-5003 – Redação Científica (2023-1).

² Doutorando e Mestre em Tecnologia da Energia pelo Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da Universidade de São Paulo (USP) e proprietário da Almatec Engenharia. E-mail: fabio_lima@usp.br.

1. INTRODUÇÃO

A obtenção de energia na natureza tem sido fundamental para a sobrevivência humana desde tempos remotos, sendo os combustíveis fósseis uma das principais fontes utilizadas. Entretanto, a exploração exagerada desses recursos tem gerado impactos ambientais relevantes, o que torna necessário a adoção de fontes energéticas mais sustentáveis.

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões de gases do efeito estufa têm causado impactos ambientais, sociais e econômicos significativos ao redor do mundo, tornando a transição energética uma estratégia crucial para mitigar as mudanças climáticas (IPCC, 2022).

Nesse sentido, o gás natural é visto como um elemento importante nessa transição, por ser um combustível mais limpo e energeticamente atrativo (MIT, 2011).

A extração deste combustível pode ocorrer de duas maneiras: a forma convencional ou não-convencional, e apesar do Brasil possuir uma das 10 maiores reservas de gás de folhelho do mundo (EIA, 2013), atualmente, apenas a extração convencional é realizada no país. Um aumento da exploração e produção do gás natural advindo de reservatório não convencional do tipo folhelho poderia reduzir a dependência da importação deste combustível.

Deste modo, o artigo em questão possui o objetivo de contribuir na questão mineralógica que envolve a extração do gás não-convencional, mormente na definição do *kick-off point* (KOP), ponto geológico que determina a transição de curvatura entre poços vertical e horizontal na Formação Irati, Bacia do Paraná.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

2.1. Bacia do Paraná

Existem três categorias de bacias sedimentares no Brasil que produzem atualmente petróleo e gás natural convencionais, sendo que as duas primeiras estão localizadas no continente e a última está situada no Oceano Atlântico (RICCOMINI, et al., 2016):

- (i) Bacias intracratônicas (sinéclises);
- (ii) Riftes interiores;
- (iii) Bacias de margem passiva.

A Bacia do Paraná corresponde a uma extensa depressão intracratônica com cerca de 1.400.000 km², em grande parte localizada no Brasil meridional (1.121.239 km²) (REATE 2020, 2020), e encontra-se distribuída nas regiões sul e sudeste, além do centro-oeste, e é sob estas três regiões brasileiras onde se encontra instalado o GASBOL (Gasoduto Bolívia-Brasil), conforme pode se observar na Figura 1, a que possui a função de transportar o gás natural importado da Bolívia para o Brasil (EIA, 2015). Cabe ainda identificar na figura em questão que a área de instalação do gasoduto praticamente se sobrepõe a área de ocorrência natural da Bacia do Paraná.

Figura 1 – Mapa do Brasil, com destaque para a localização geográfica da Bacia do Paraná e o traçado do GASBOL no território brasileiro.



Fonte: Construído pelo autor a partir de informações de CPRM (2016) e Ministério da Infraestrutura do Brasil (2020).

Conforme apresentado na Figura 2, a sequência de rochas sedimentares e magmáticas que compõe o seu conjunto, com idade compreendida entre o período paleozoico e

mesozoico, possui uma espessura máxima de aproximadamente 7.000 metros (ZALÁN, et al., 1990), como pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Coluna estratigráfica da Bacia do Paraná

SYSTEM	SSE	LITHOSTRATIGRAPHY	NNW	TECTONIC EVENTS
CRETACEOUS		BAURU GP		
JURASSIC		SERRA GERAL FM		SOUTH ATLANTIC RIFTING
TRIASSIC		BOTUCATU FM		PRE - RIFT
		ROSÁRIO DO SUL GP PIRAMBOIA FM		
PERMIAN	PALERMO FM	TERESINA/RIO DO RASTO FMs		FINIHERCYNIAN OROGENY
		IRATI FM		
		RIO BONITO FM		TARDIHERCYNIAN OROGENY
		ITARARE GP AQUIDAUANA FM		
CARBONIFEROUS				
DEVONIAN		PONTA GROSSA FM		EOHERCYNIAN OROGENY
SILURIAN		FURNAS FM		CALEDONIAN OROGENY
		VILA MARIA FM		
ORDOVICIAN		RIO IVAÍ FM		

Fonte: Modificado pelo autor através de (ZALÁN, et al., 1990).

2.2. Formação Irati

A Formação Irati, localizada na Bacia do Paraná, é caracterizada pela sedimentação em condições de mar restrito, com características mais salinas da base para as extremidades superiores, apontando para a presença de folhelhos betuminosos (HACHIRO, 1991); (NORTHFLEET, et al., 1969); (PADULA, 1968) e (SCHNEIDER, et al., 1974).

De acordo com Ramos e Formoso (1975), o folhelho dessa formação constitui-se em uma das maiores reservas de pirobetume do mundo, com excelentes teores de matéria orgânica total (TOC) que atingem valores entre 0,04 e 21% (LIMA, 2021).

Adicionam-se de maneira positiva à presente discussão, as seguintes circunstâncias: a existência de reservas convencionais de gás natural na Bacia do Paraná, a exemplo do campo de Barra Bonita, bem como a presença de mercados consumidores significativos na região ou arredores (REATE 2020, 2020). Dessa forma, de posse dessas informações, é possível

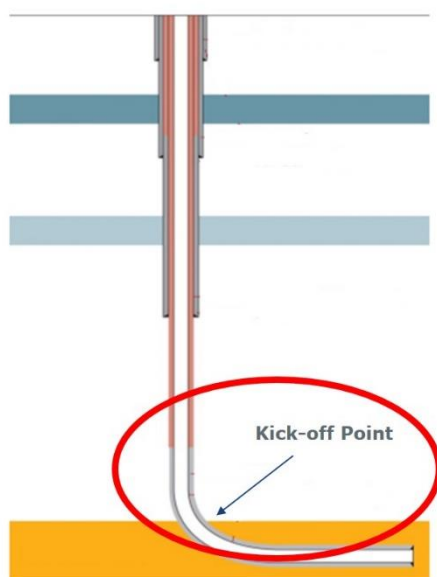
inferir que a Bacia do Paraná apresenta potencial para análises mais aprofundadas, incluindo aquelas que visem à prospecção de gás de folhelho.

2.3. Kick-off point

Folhelho é uma rocha sedimentar finamente granulada, físsil e de baixa permeabilidade, resultante da consolidação de partículas de argila. Sua permeabilidade varia entre 0,00001 e 0,01 mD, podendo chegar a alguns nano Darcys em formações mais rígidas (PETERS, et al., 2016). O folhelho é uma das principais fontes de gás natural em bacias sedimentares no Brasil e no mundo e é sujeita a extração de gás não convencional através do fraturamento hidráulico, que consiste na injeção de um fluido com alta pressão em uma formação rochosa de folhelho com o objetivo de produzir trincas/fissuras, promovendo desta forma a recuperação do gás ali aprisionado (EPA, 2021).

Antes disso, são realizados estudos prévios de viabilidade geológica e geofísica, bem como a construção de poços verticais e horizontais, sendo este último perfurado apenas após determinação bem-sucedida do ponto de transição, conhecido como *kick-off point*. O KOP é calculado com base em dados geológicos obtidos por ferramentas de engenharia de perfuração, seguindo restrições de perfuração. O planejamento da trajetória direcional requer diversos cálculos para percorrer a trajetória correta de inclinação, medida em graus de 0° na vertical a 90° para cima.

Figura 3 - Esboço da construção típica dos poços vertical e horizontal, com destaque ao *kick-off point* (croqui sem escala)



Fonte: Adaptado pelo autor a partir de Mair et al. (2012).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo do artigo, será apresentada a sequência e a metodologia utilizada para a análise de dados durante o desenvolvimento do trabalho, desde um breve relato do local onde as amostras foram coletadas, contemplando também o método laboratorial com que as amostras foram tratadas.

Estes dados, somados a uma revisão bibliográfica de trabalhos correlatos que também se debruçaram sobre as características geológicas da Bacia do Paraná sevem de subsídios para comparação com as características mineralógicas das camadas de folhelho em países já produtores de gás de folhelho: EUA, China, Canadá e Argentina.

3.1. Análise em laboratório de amostras coletadas em trabalhos de campo

O estudo coletou amostras de campo para observar posteriormente no laboratório da Universidade as propriedades mineralógicas da Formação Irati. Puderam ser observados propriedades geológicas importantes, como a espessura e continuidade lateral das rochas da Formação Irati, incluindo as camadas de folhelho, bem como as rochas carbonáticas intercaladas e vulcânicas associadas.

As frentes de lavra visitadas durante a pesquisa pertencem a três empresas de mineração no estado de São Paulo:

- (i) Partecal-Partezani Calcários, localizada em Rio Claro
- (ii) Amaral Machado Mineração, em Saltinho
- (iii) Calcário Cruzeiro, em Limeira.

Além disso, foram analisadas também, outras amostras coletadas da Formação Irati anteriormente por outros pesquisadores da Universidade. Essas amostras são oriundas de:

- (i) Frentes de lavra da Partecal-Partezani Calcário e da Calcário Bernardino
- (ii) Afloramentos nas proximidades de São Mateus do Sul, no Paraná
- (iii) Coluna White, em Santa Catarina

No total, foram analisadas vinte e oito amostras, devidamente numeradas e com as respectivas coordenadas geográficas do local de extração, sendo que quatro das amostras são de folhelho da base da Formação Serra Alta.

Para facilitar a localização geográfica das amostras, foi elaborado um mapa com base nas isópacas de Zalán et al. (1990), que mostra a borda leste da Bacia do Paraná, onde as amostras foram coletadas. As linhas de isópacas representam a espessura mínima a ser perfurada verticalmente antes de se atingir o topo do Membro Assistência da Formação Irati, que varia entre 1300 na parte central da bacia, área oeste do estado do Paraná, e 100 m na borda sul no sudoeste do estado do Rio Grande do Sul. Este mapa será importante na análise do fraturamento hidráulico da unidade.

Figura 4 – Localização das amostras analisadas nos estados de SP, PR e SC



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

Tabela 1 – Procedência das amostras coletadas e suas respectivas coordenadas geográficas e numeração adotada no laboratório

Cidade	Empresa/ Área	Local	Coordenadas geográficas	Amostra	n° amostra LAB PETRO	Fm.
Rio Claro (SP)	Partecal-Partezani	IRT-06	47°34'41,80"O 22°30'48,31"S	IRT-06	446	Irati
Saltinho (SP)	Bernardino	IRT-07	47°42'27,37"O 22°53'15,20"S	IRT-07	447	
		IRT-08		IRT-08	448	
		IRT-09		IRT-09	449	
	Amaral Machado	AMM-01	47°43'12,00"O 22°52'47,14"S	AMM-01-01	906	
				AMM-01-02	907	
				AMM-01-03	908	
Limeira (SP)	Calcário Cruzeiro	CCZ-01	47°26'37,51"O 22°32'19,11"S	CRUZ01	913	
				CRUZ02	914	
				CRUZ03	915	
				CRUZ04	916	
				CRUZ05	917	
				CRUZ06	918	
				CRUZ07	919	
				CRUZ08	920	
São Mateus do Sul (PR)	Afloramentos próximos a Petrosix	GBR-137	50°22'43,19"O 25°53'32,99"S	GBR-137A	863	Serra Alta
				GBR-137B	864	
				GBR-137C	865	
		GBR-138	50°23'2,795"O 25°52'34,82"S	GBR-138A	866	Irati
				GBR-138B	867	
		GBR-139	50°24'19,21"O 25°50'42,63"S	GBR-139A	868	
				GBR-139B	869	
				GBR-139C	870	
		GBR-140	50°24'24,372"O 25°50'1,922"S	GBR-140A	871	
				GBR-140B	872	
		GBR-141	50°25'57,175"O 25°47'11,759"S	GBR-141	873	Serra Alta
		GBR-142	50°25'29,766"O 25°47'36,617"S	GBR-142	874	
Coluna White (SC)	Afloramentos próximos a Coluna White	ICR-014	49°28'16,84"O 28°23'14,87"S	ICR-014	862	Irati

Fonte: (LIMA, 2021)

3.1.1. Metodologia da preparação das amostras totais de folhelho para análise por DRX

Para a análise por difração de raios X, todas as amostras foram submetidas a um processo de secagem à temperatura ambiente. Depois da secagem, foram selecionados cuidadosamente fragmentos que representavam bem cada exemplar, e estes foram moídos manualmente em almofariz e pistilo de ágata, até obter um pó homogêneo, como exemplificado na Figura 5.

Figura 5 – Etapas da preparação de amostra para DRX: (A) obtenção e seleção de fragmentos para moagem; (B) moagem manual; (C) uma alíquota do pó obtido de cada amostra foi prensada sobre porta amostra pela técnica da prensagem de pó (MOORE; REYNOLDS, 1997). Cada porta amostra com o pó prensado foi identificado com numeração fornecida pelo laboratório, que por sua vez identifica o difratograma de raios X; (D) amostra pronta para análises por difração de raios X (DRX)



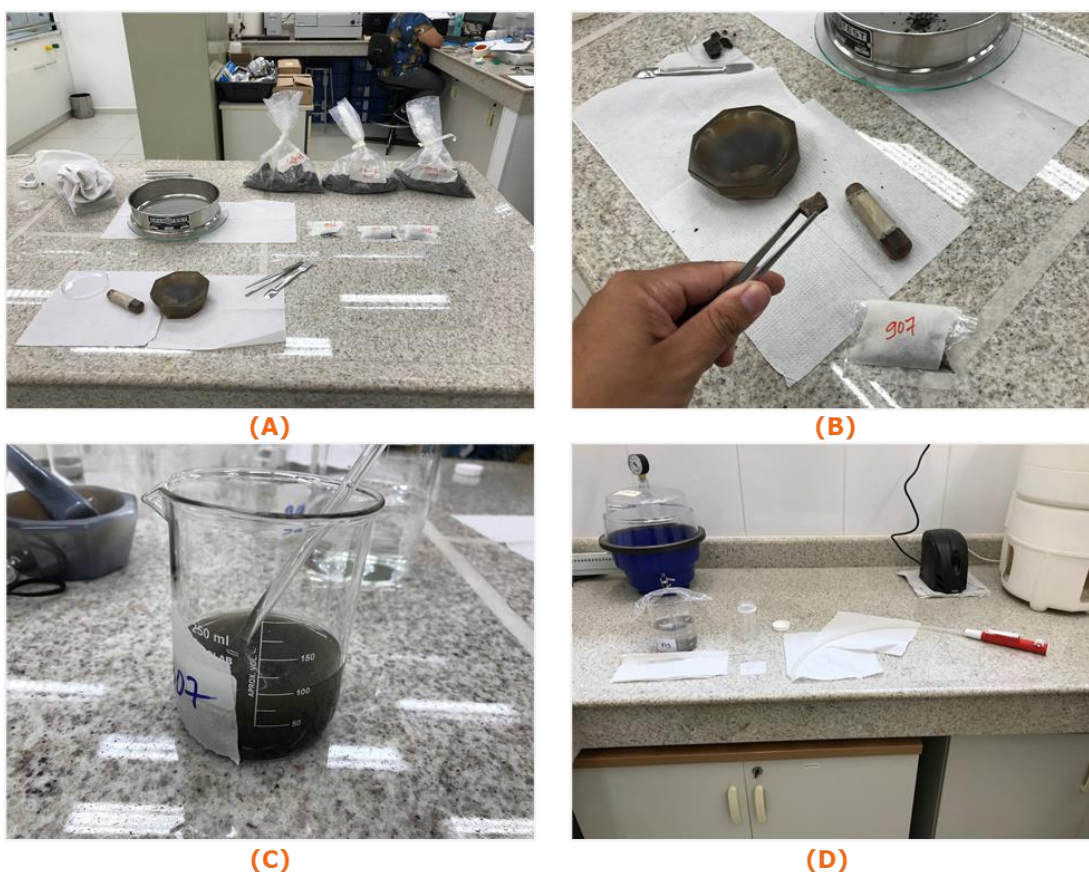
Fonte: (LIMA, 2021).

3.1.2. Metodologia da preparação da fração argila para análise por DRX

Com o objetivo de avaliar o teor e os tipos de argilominerais presentes nas rochas, todas as vinte e oito amostras foram submetidas à análise da fração argila.

A fração fina, com tamanho inferior a 2 μm , foi utilizada para identificar os argilominerais. Para obter essa fração, as amostras foram submetidas às seguintes etapas: (i) secagem em estufa a uma temperatura inferior a 40°C; (ii) moagem manual de fragmentos selecionados com o auxílio de almofariz e pistilo de ágata, seguido de peneiramento com trama de 0,35 mm; (iii) tratamento com H_2O_2 , adicionando-se água ultrapura a uma temperatura controlada inferior a 60°C por no máximo 40 minutos, seguido de lavagem; (iv) pipetagem da fração argila inferior a 2 μm , como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Etapas da preparação de amostra para DRX (fração argila): (A) seleção de fragmentos para moagem; (B) moagem manual; (C) tratamento com H_2O_2 , com água ultrapura; (D) pipetagem da fração argila inferior a 2 μm



Fonte: (LIMA, 2021).

3.1.3. Análise por difração de raios X

As amostras de folhelhos foram preparadas (total e em frações de argila), em seguida submetidas à análise de difração de raios X (DRX) para avaliar a composição mineralógica de forma qualitativa e semiquantitativa.

A DRX é amplamente utilizada na caracterização mineralógica de solos, sedimentos e rochas. A técnica consiste em expor o material em pó (obtido após moagem) a um feixe monocromático de raios X que difrata a partir de sua interação com planos atômicos formadores da estrutura cristalina. A lei de Bragg determina os ângulos de difração, levando em conta o espaçamento entre planos atômicos adjacentes e o comprimento de onda do feixe incidente. Com cada mineral possuindo uma estrutura cristalina própria, caracterizada por planos atômicos com distintos espaçamentos, a Lei de Bragg pode identificar valores de espaçamento entre planos e, conseqüentemente, os minerais presentes na amostra.

A análise de DRX foi realizada no Difratorômetro Bruker D8 Advance equipado com detector LYNXEYE XE e sistema theta-theta.

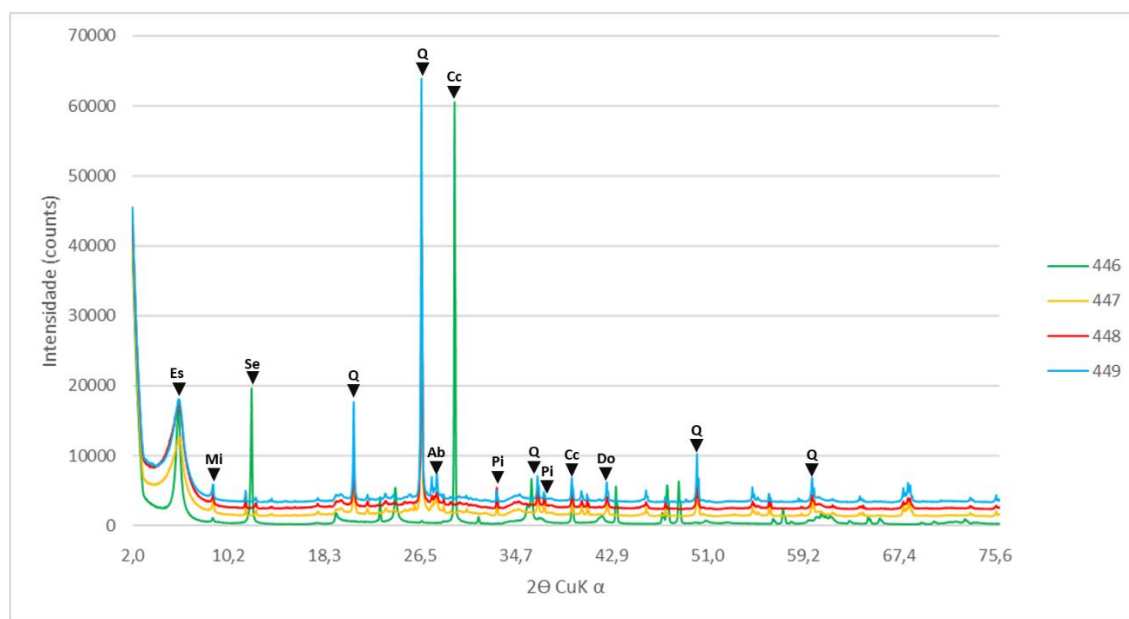
Os difratogramas foram obtidos com radiação CuK alpha, 40kV, 25mA, air-scatter automático, passo de 0,02 grau 2θ , tempo de aquisição de 3,1 segundos e utilizando fendas primárias de 0,5 mm e secundárias de 1,0 mm.

4. RESULTADOS

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).

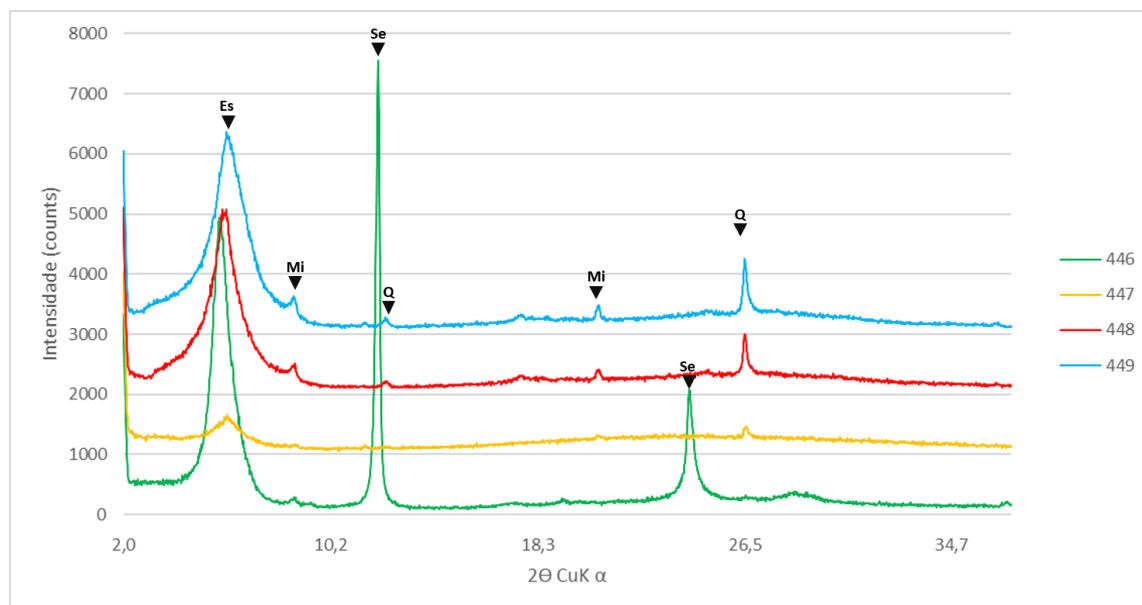
Conforme elucidado na etapa anterior, as amostras foram submetidas as análises de DRX, resultando nos gráficos (Figuras 7 a 26) exibidos a seguir.

Figura 7 – 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)



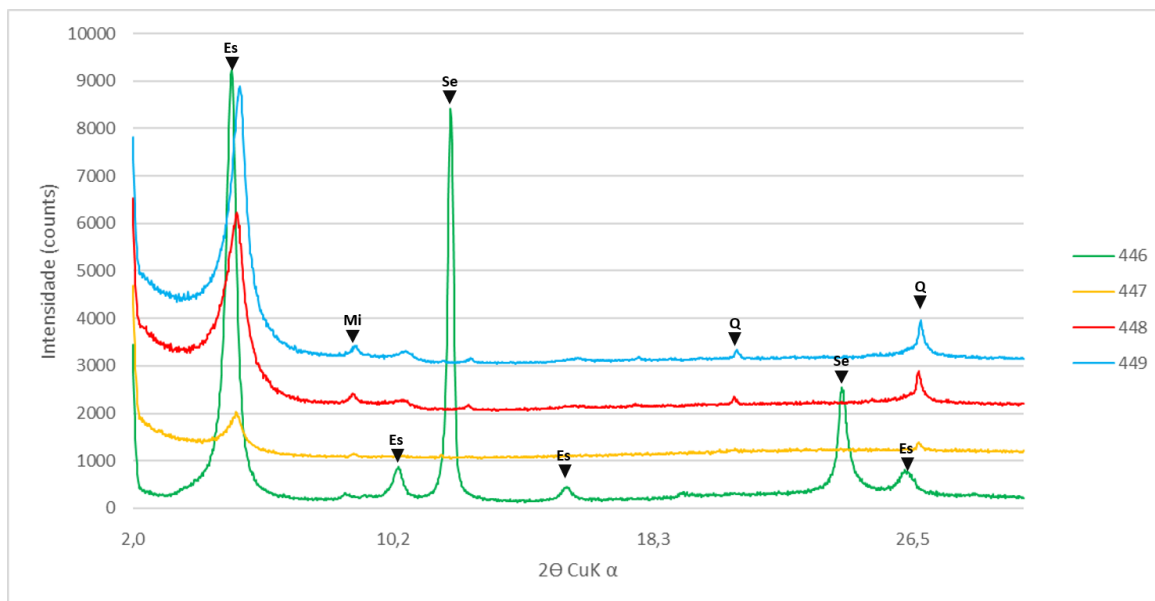
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Difratomogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 446 a 449 (Es – esmectita, Mi – mica, Se – serpentina, Q – quartzo)



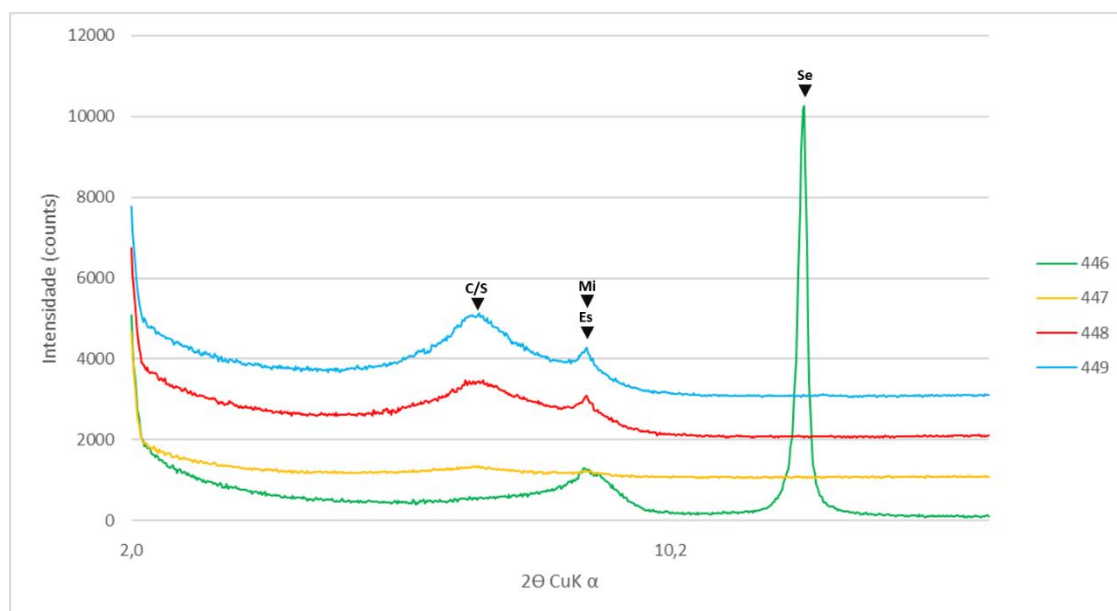
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Difratomogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 446 a 449 (Es – esmectita, Mi – mica, Se – serpentina, Q – quartzo)



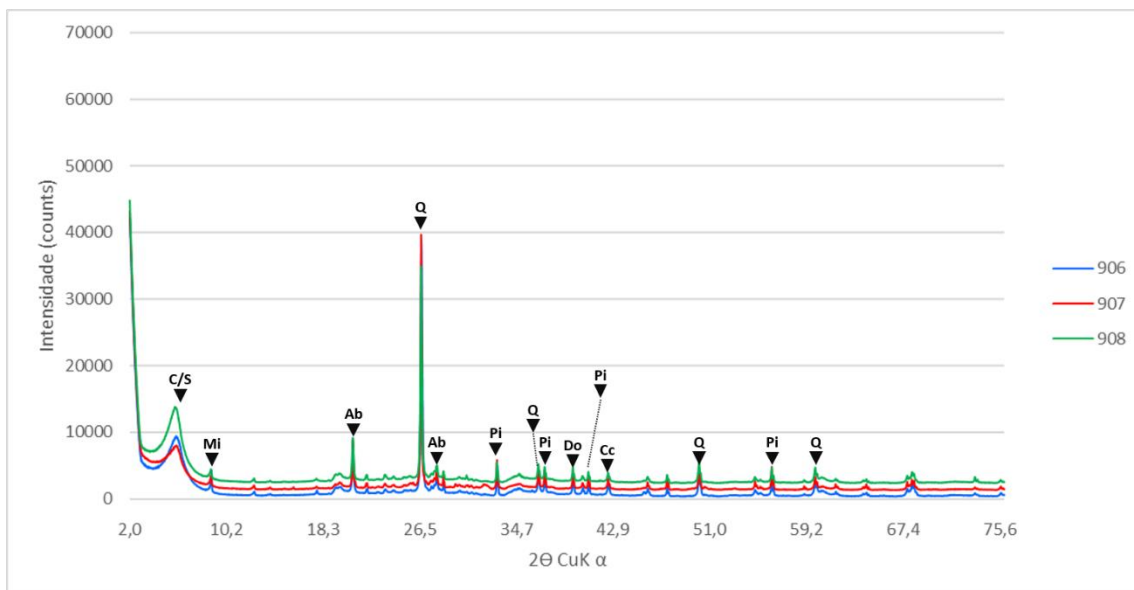
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Difratomogramas de raios X da fração argila calcinada das amostras 446 a 449 (C/S – corrensite, Mi – mica, Es – esmectita, Se – serpentina)



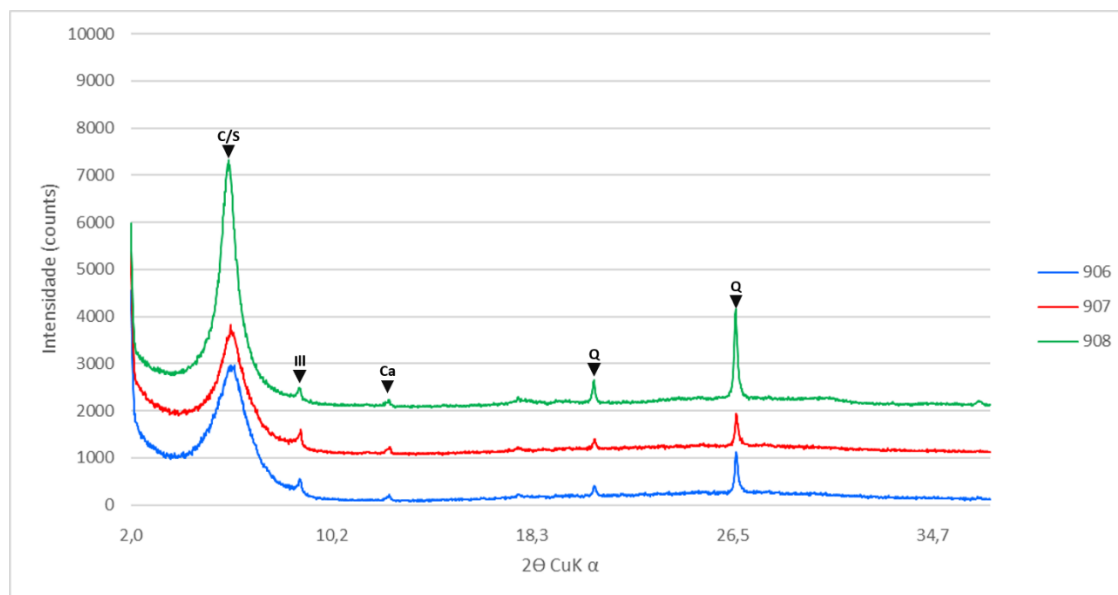
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Difratomogramas de raios X de amostra total das amostras 906 a 908 (C/S – corrensite, Mi – mica, Al – albita, Q – quartzo, Pi – pirita, Do – dolomita, Cc – calcita)



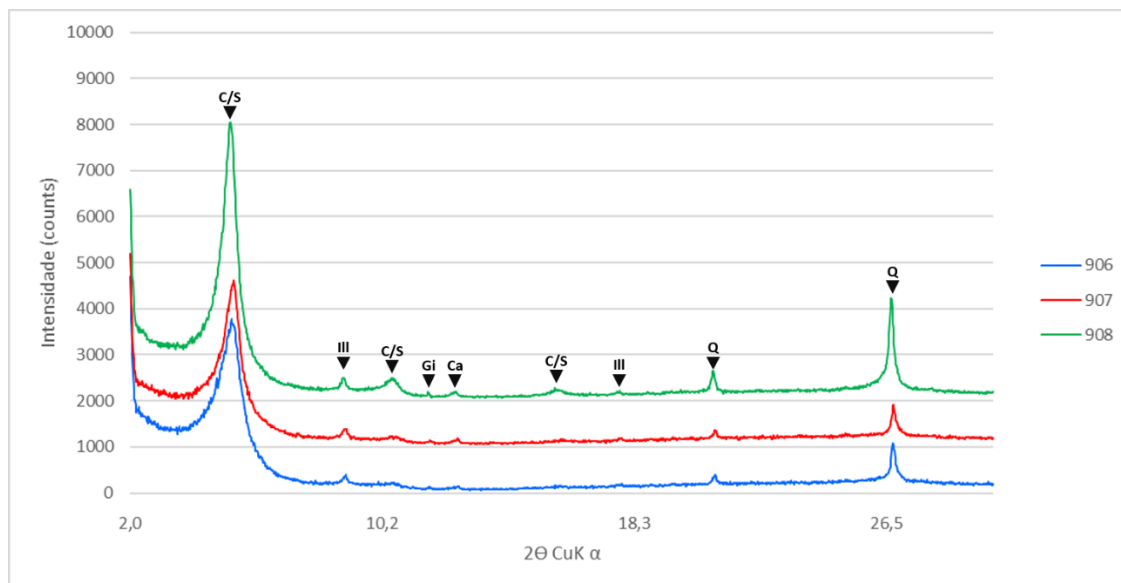
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Difratomogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 906 a 908 (C/S – corrensite, Ill – illita, Ca – caulinita, Q – quartzo)



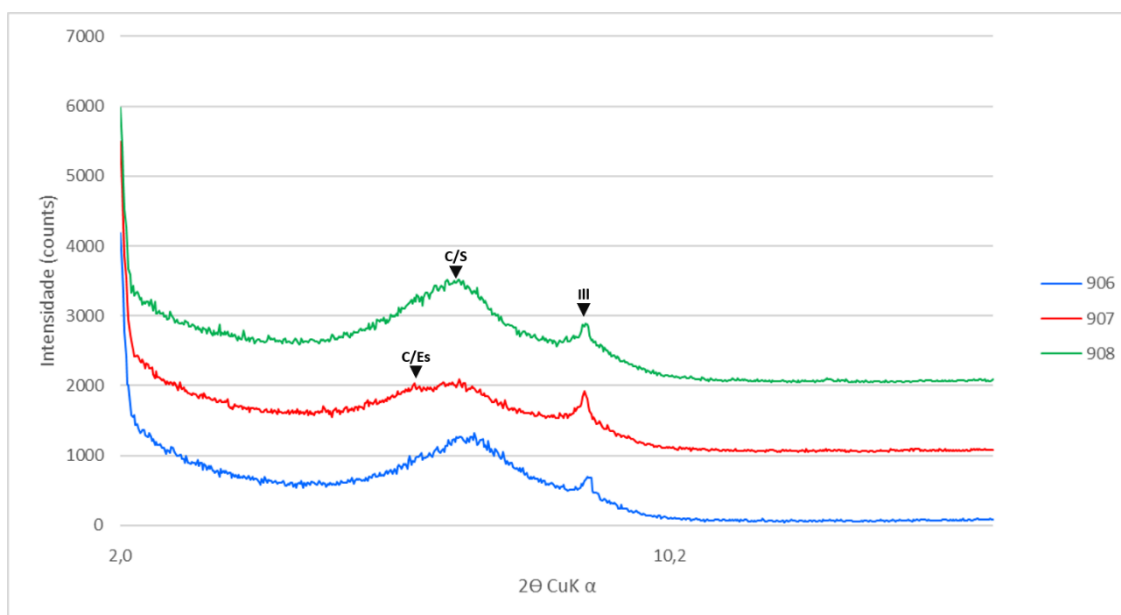
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Difratomogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 906 a 908 (C/S – corrensitita, Ill – illita, Gi – gipsita, Ca – caulinita, Q – quartzo)



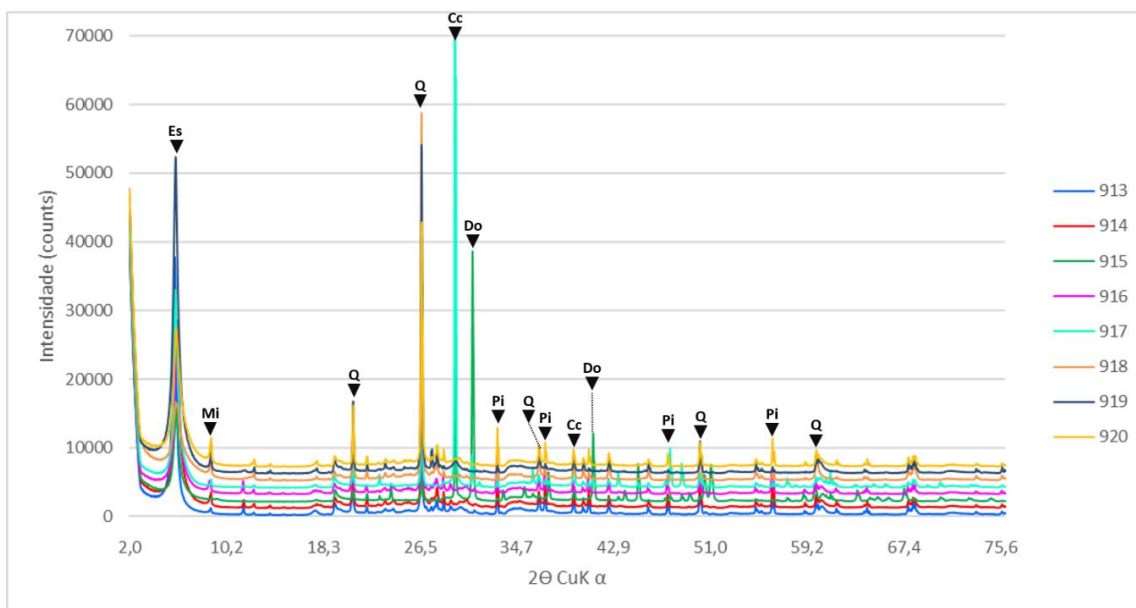
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Difratomogramas de raios X da fração argila calcinada das amostras 906 a 908 (C/S – corrensitita, Ill – illita)



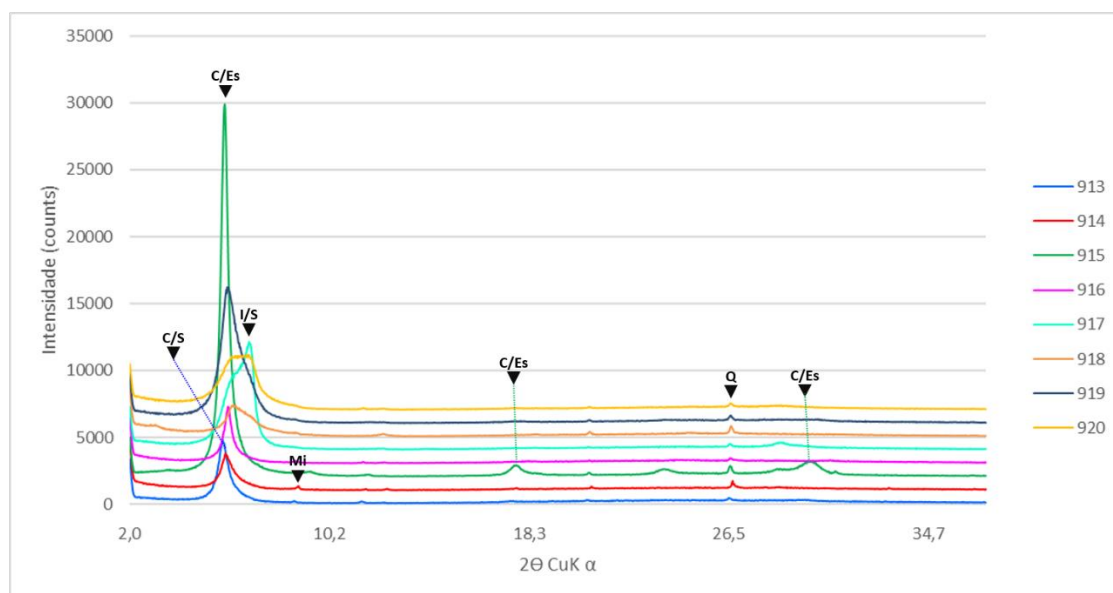
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Difratoformas de raios x de amostra total das amostras 913 a 920 (Es – esmectita, Mi – mica, Q – quartzo, Cc – calcita, Do – dolomita, Pi – pirita)



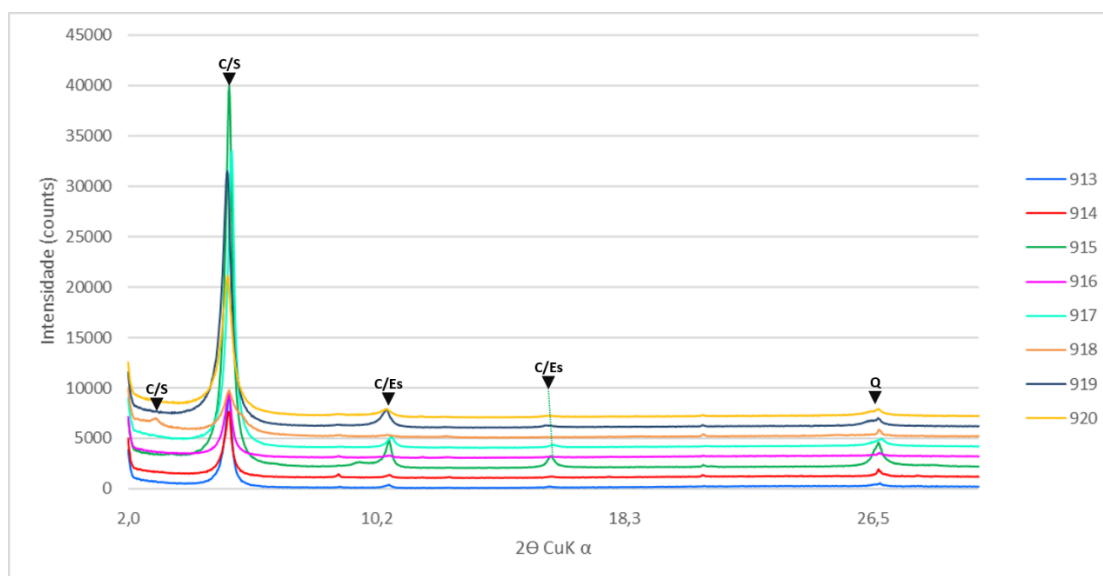
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Difratoformas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 913 a 920 (C/S – corrensite, C/Es – argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita, Mi – mica, Q – quartzo)



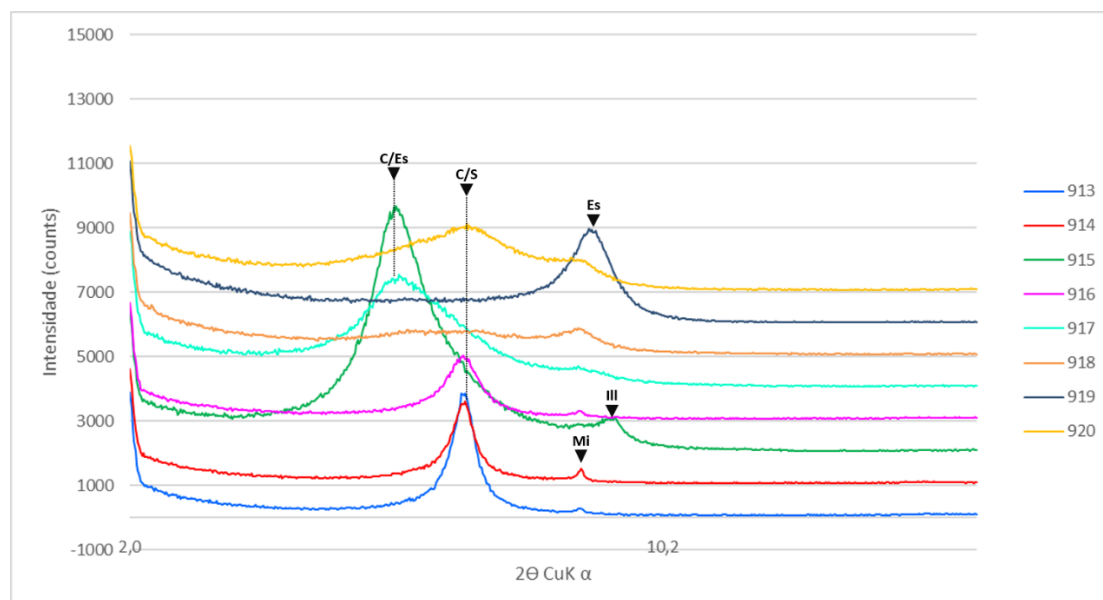
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 17 – Difratomogramas 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)



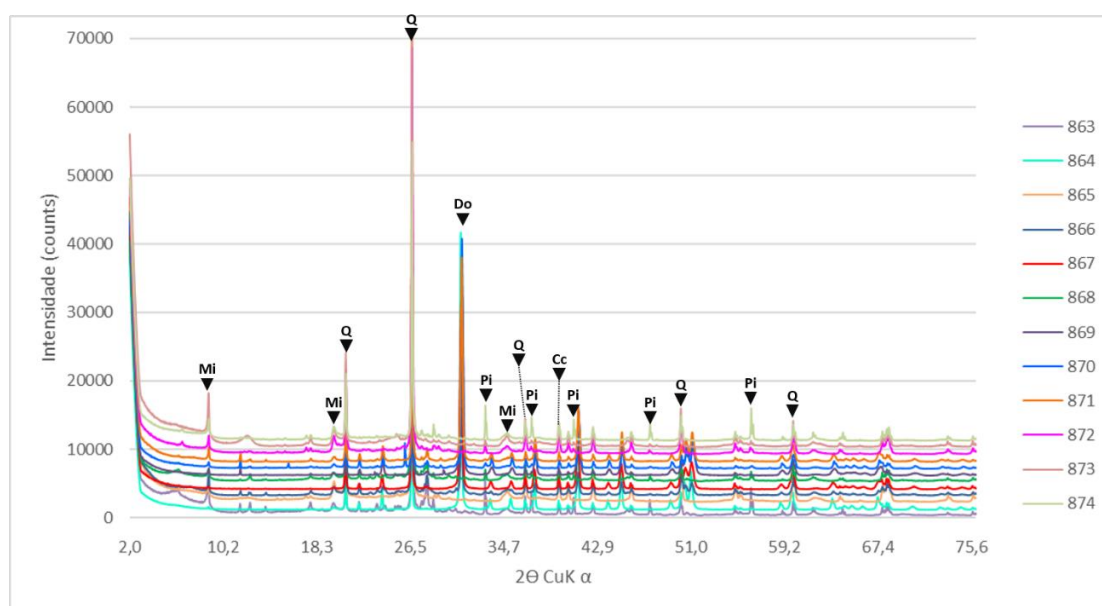
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 – Difratomogramas 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 – ilita)



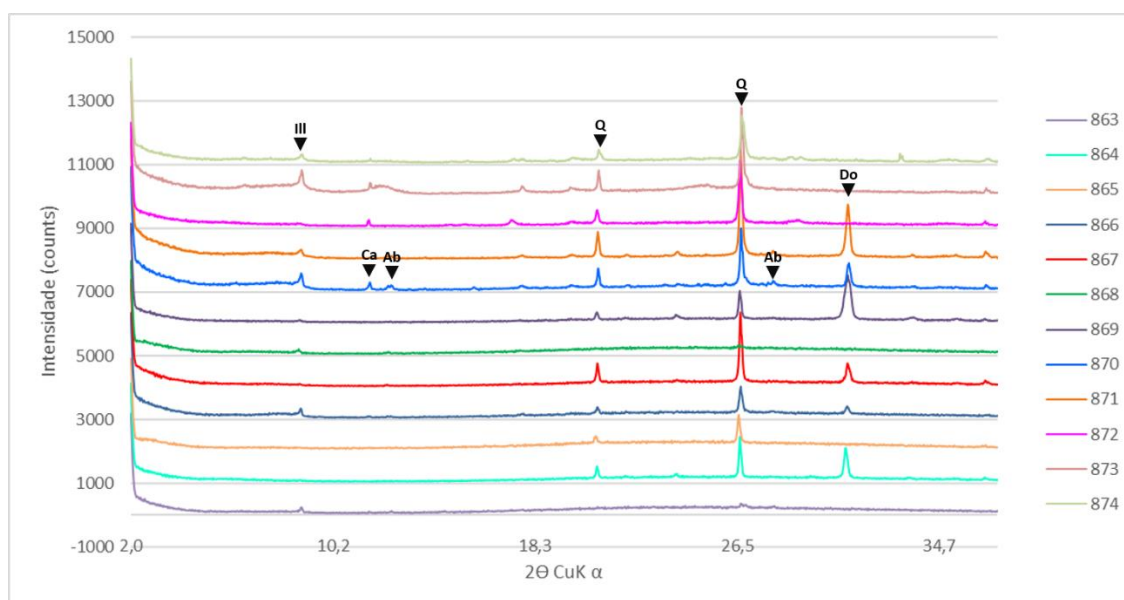
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Difratomogramas de raios X de amostra total das amostras 863 a 874 (Mi – mica, Q – quartzo, Do – dolomita, Pi – pirita, Cc – calcita)



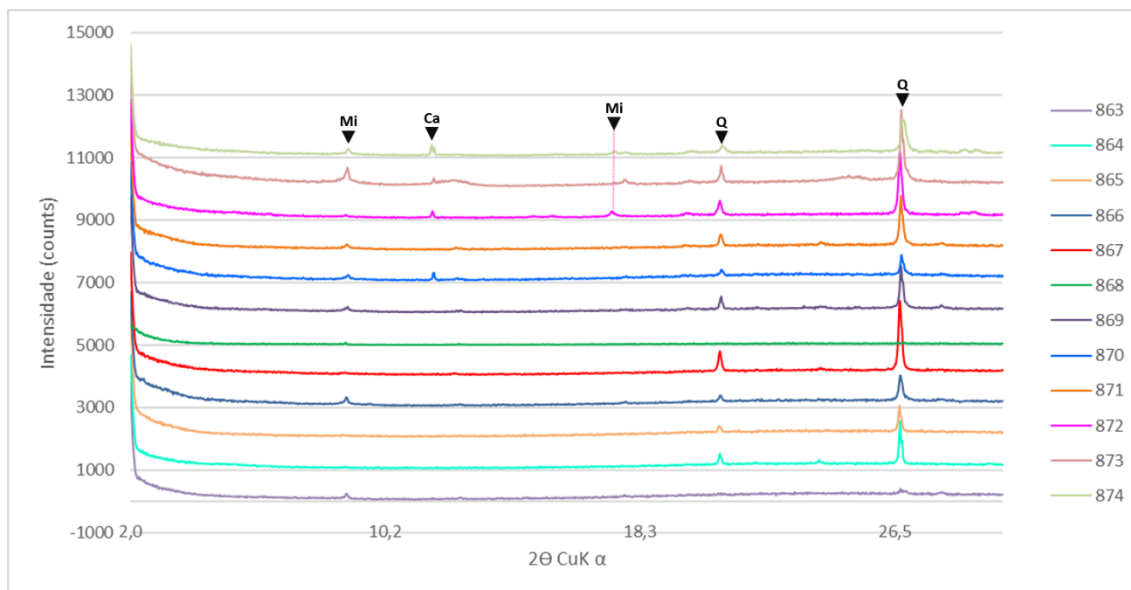
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 – Difratomogramas de raios X da fração argila seca ao ar das amostras 863 a 874 (Ill – illita, Ca – caulinita, Ab – albita, Q – quartzo, Do – dolomita)



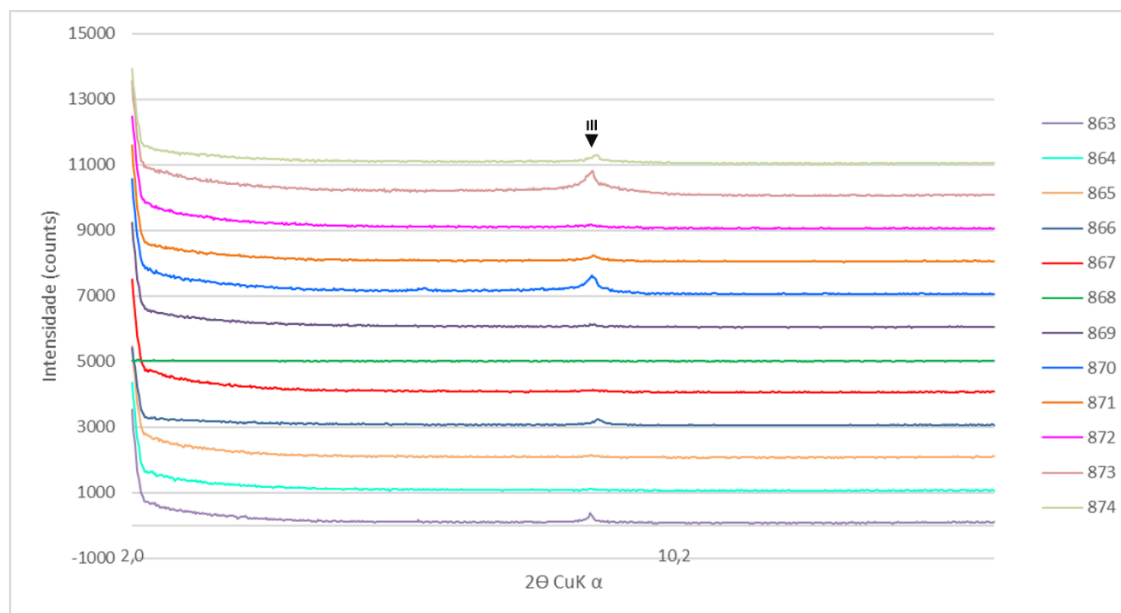
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 – Difratomogramas de raios X da fração argila solvatada com etilenoglicol das amostras 863 a 874 (Mi – mica, Ca – caulinita, Q – quartzo)



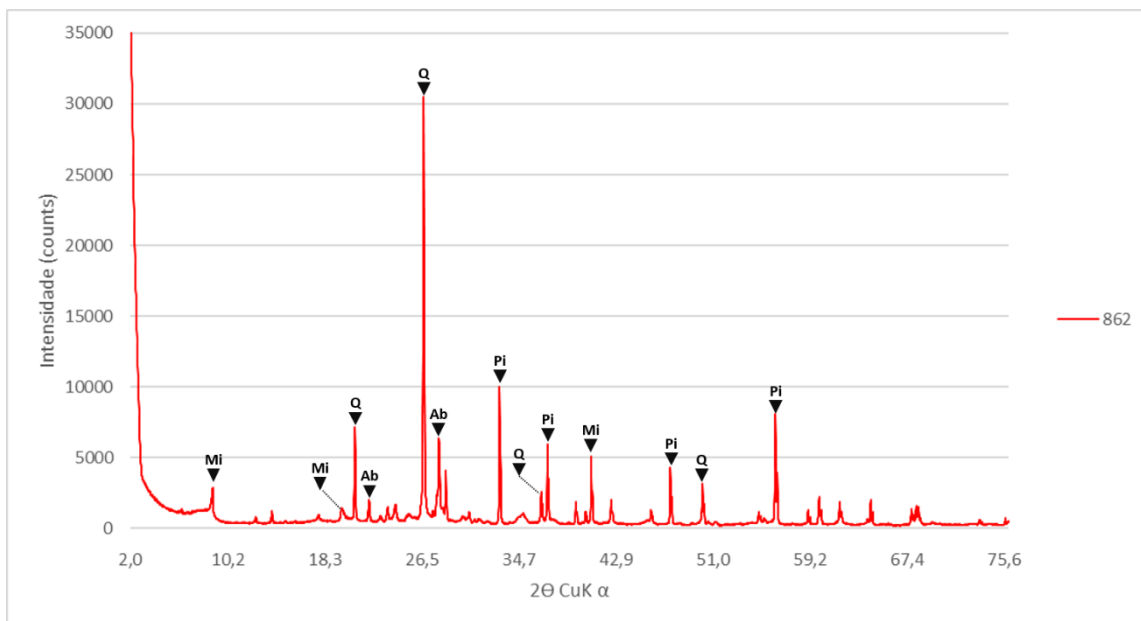
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Difratomogramas de fração argila calcinada das amostras 863 a 874 (Ill – illita)



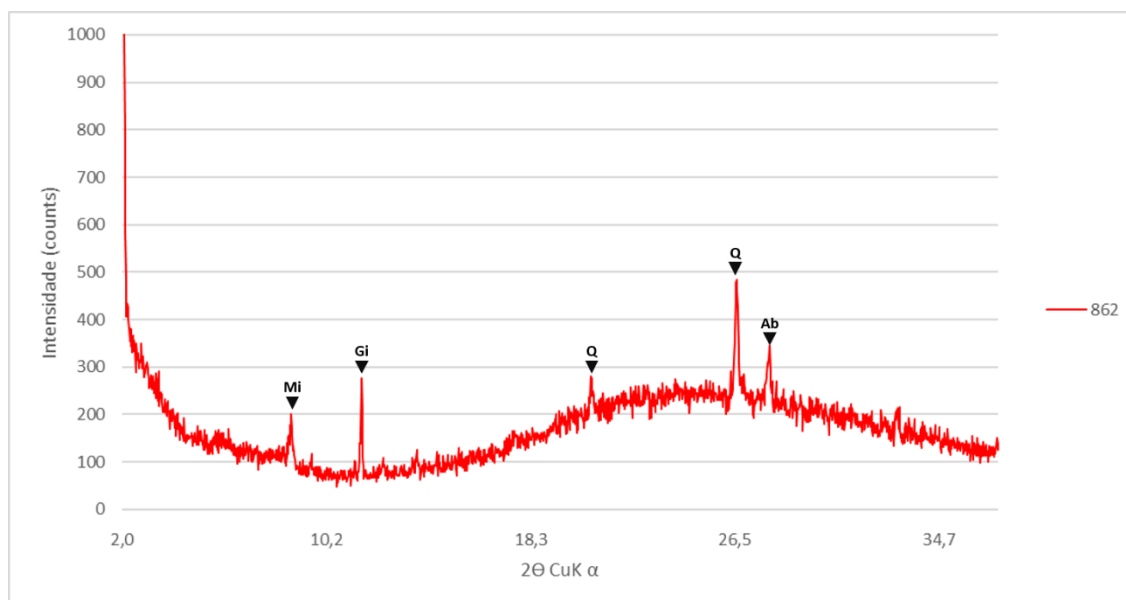
Fonte: Elaborado pelo autor.

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



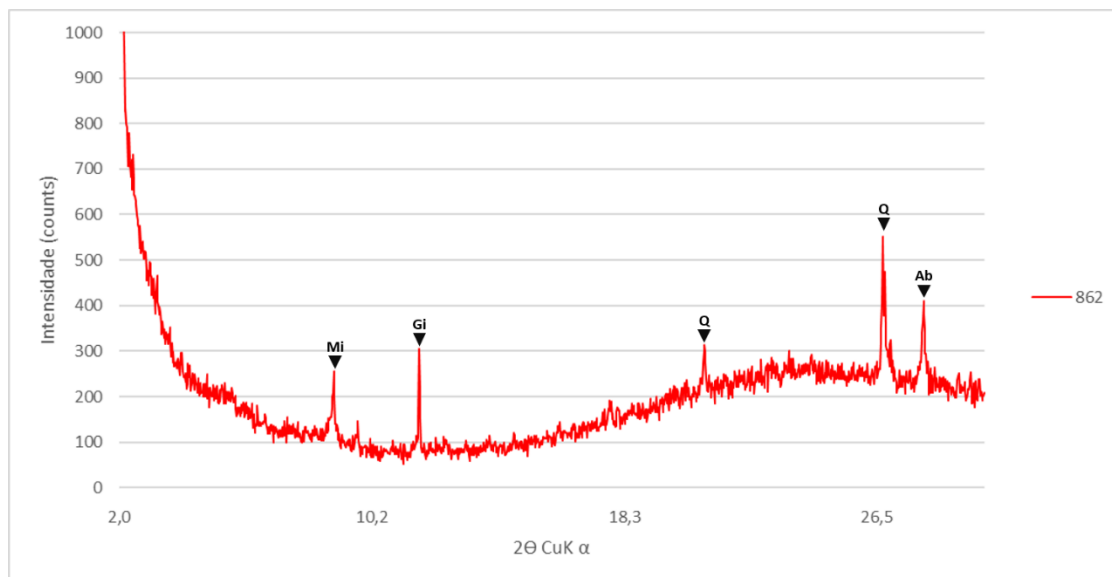
Fonte: Elaborado pelo autor.

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



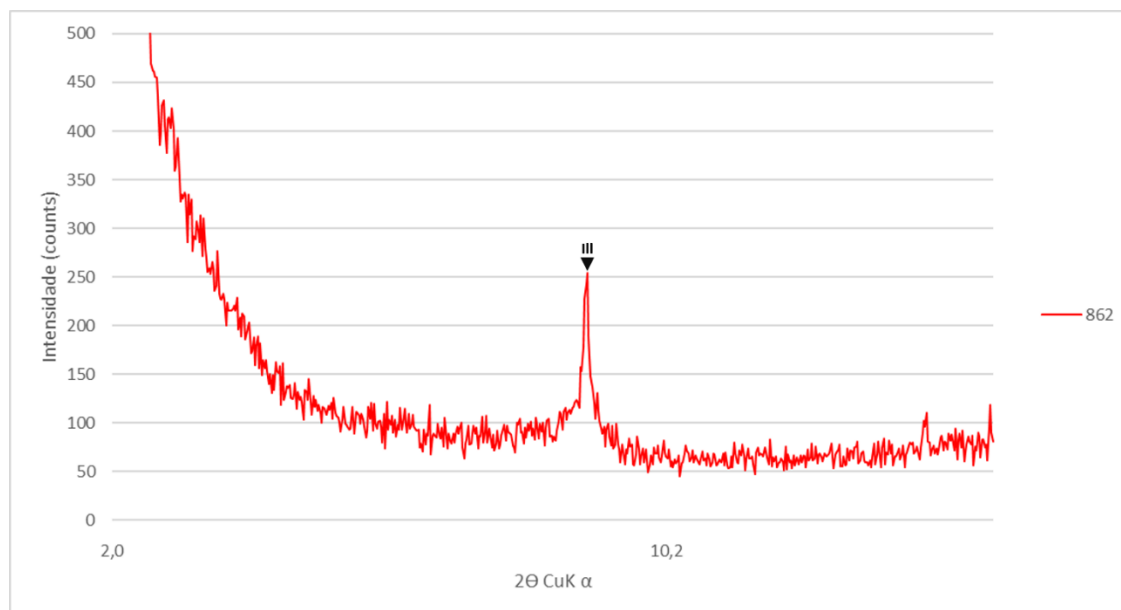
Fonte: Elaborado pelo autor.

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 – illita)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a análise realizada a partir dos difratogramas produzidos, pôde ser construída a Tabela 2, resumindo e evidenciando os minerais identificados por difração de raios X nas amostras coletadas em campo.

Tabela 2 – Minerais identificados por difração de raios X nas amostras coletadas no Membro Assistência da Formação Irati (Q – quartzo, Ab – albita, C/S – corrensite, C/Es – argilomineral interestratificado irregular clorita/esmectita, Es – esmectita, Cl – clorita, I/S – argilomineral interestratificado desordenado illita/esmectita, Mi – mica, Ill – illita, Se – serpentina, Ca – caulinita, Pi – pirita, Gi – gipsita, Cc – calcita Do – dolomita)

Minerais	silicatos										sulfeto		sulfato	carbonatos	
	tecto		filo												
amostra	Q	Ab	C/S	C/Es	Es	Cl	I/S	Mi	Ill	Se	Ca	Pi	Gi	Cc	Do
446	●				●			●		●				●	
447	●	●	●		●			●			●	●	●		
448	●	●	●		●			●			●	●	●		
449	●	●	●					●			●	●	●		
906	●	●	●						●		●	●			
907	●	●	●	●					●		●	●			
908	●	●	●						●		●	●			
913	●	●	●					●			●	●	●		
914	●	●	●					●			●	●	●		
915	●			●				●	●			●		●	●
916	●	●	●					●			●	●	●		
917	●			●			●					●	●	●	●
918	●	●	●	●			●	●			●	●			
919	●	●			●			●			●	●			
920	●	●	●				●	●			●	●			
863	●	●			●	●			●		●	●	●		
864	●				●				●						●
865	●						●								
866	●	●					●		●		●		●		●
867	●						●		●		●				●
868	●	●							●		●	●			
869	●	●				●			●		●		●		●
870	●	●			●	●			●		●	●	●		●
871	●	●				●			●		●		●		●
872	●				●				●			●			
873	●	●				●			●		●	●			
874	●	●				●	●		●			●			
862	●	●		●				●	●			●			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adicionalmente, de modo a contribuir para a identificação da composição mineralógica das rochas, em especial dos folhelhos da Fm. Irati, os dados foram analisados de forma semiquantitativa pelo método RIR (*Reference Intensity Ratio*). Tal análise das fases minerais foi realizada a partir da medição das áreas de picos selecionados para cada fase mineral, as quais foram ponderadas por fatores de referência de intensidade, de acordo com

o método de RIR (HILLIER, 1999). Os picos selecionados para medição das áreas e seus valores de RIR são: quartzo (4,26Å) – RIR 0,91; filossilicatos (4,47Å) – RIR 0,71; feldspato potássico (3,23Å) – RIR 1,0; albita (3,19Å) – RIR 2,2; calcita (3,03Å) – RIR 3,1; dolomita (2,89Å) – RIR 2,7; pirita (2,70Å) – RIR 1,8.

Os dados resultantes da análise semiquantitativa das amostras estão apresentados na Tabela 3, indicando as proporções de carbonatos (calcita e dolomita), quartzo e feldspatos, e filossilicatos em porcentagem. A média mineralógica dos folhelhos do Mb. Assistência consiste em 15,4% de carbonato, 48,8% de quartzo e feldspato, e 35,7% de filossilicatos. Já os dolomitos desse membro apresentam uma 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.

A partir desses resultados, foi possível criar um diagrama ternário (Figura 27), que exhibe essas associações minerais nos seus vértices. As três amostras de dolomito (864, 867 e 869) foram incluídas neste gráfico, visto que a análise mineralógica via difração de raios X mostrou a presença de quartzo, argilominerais e, adicionalmente, feldspato na amostra 869. Essa composição mineralógica não é diferente daquela 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 nas frentes de lavra visitadas em São Paulo e nos afloramentos no Paraná, implica uma avaliação conjunta dessas litologias no que se refere à sua fracabilidade³.

Em resumo, os resultados da análise das amostras permitiram a obtenção de informações importantes sobre as proporções minerais presentes nas rochas estudadas e sua possível influência na sua fragilidade. Essas informações são fundamentais para a compreensão das características geológicas da região e podem ser utilizadas para futuros estudos e aplicações em geologia.

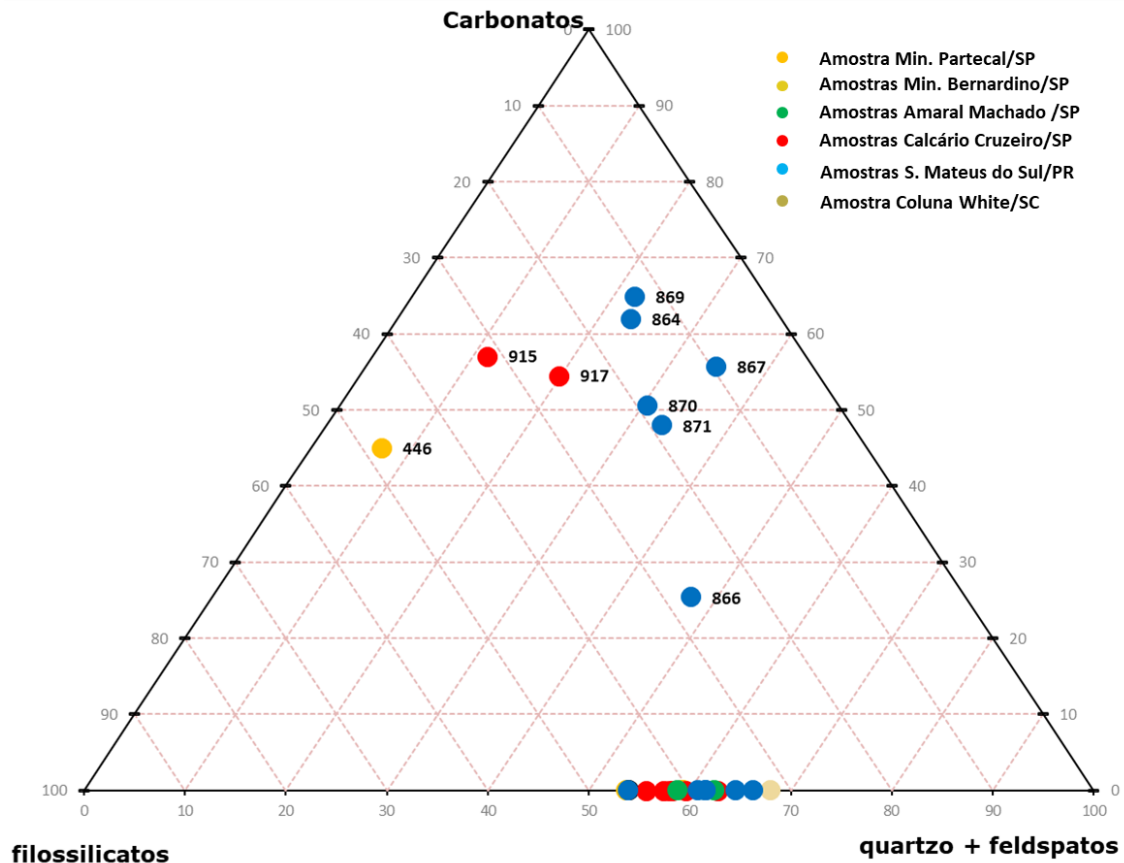
³ Se procurada em dicionário, nos dias de hoje, a palavra fracabilidade não será encontrada, uma vez que não existe ainda uma definição para este verbete no idioma português. Todavia, convém desde já aclarar o conceito de *fracability* (LIMA, 2021). *fracabilidade* pode ser definida como o grau de facilidade em fraturar uma formação rochosa com o objetivo de criar uma complexa rede de fraturas, e desta forma obter uma estreita relação no tocante aos efeitos da estimulação do reservatório (LIU, et al., 2019).

Tabela 3 – 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.

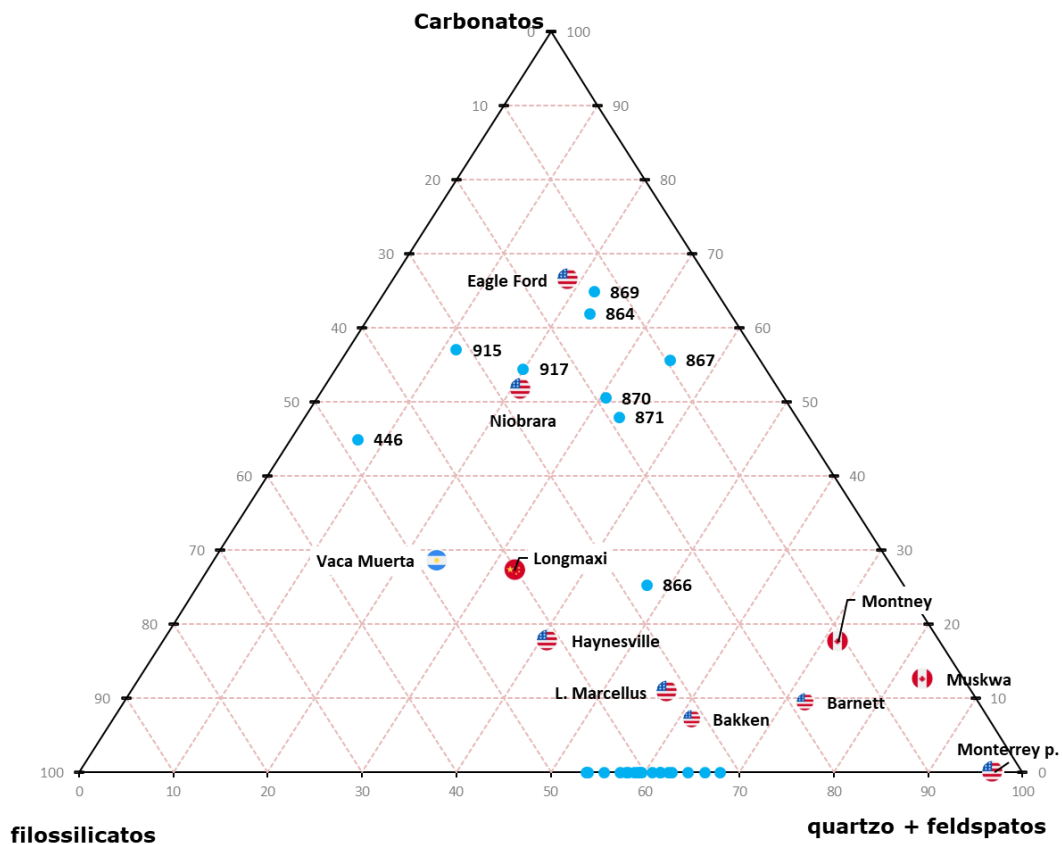
Analisando o diagrama ternário, pode-se observar que cerca de 70% das 28 amostras não contêm carbonatos, enquanto a amostra 446, da Mineração Partecal em SP, tem baixo teor de quartzo. Duas amostras (915 e 917) coletadas na Calcário Cruzeiro em Limeira/SP possuem alta concentração de carbonatos. Já seis amostras de São Mateus do Sul/PR, correspondentes a 50% das amostras, apresentam distribuição equilibrada, com menor presença de filossilicatos e maior contribuição de quartzo, feldspato e carbonatos.

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

A Figura 28 foi gerada adicionando-se os dados mineralógicos de folhelhos produtores de gás de folhelho de outros países importantes mundialmente no gráfico ternário de representação da composição mineralógica do Membro Assistência. Observa-se que amostras de dolomito da Fm. Irati possuem composição similar a folhelho da Fm. Eagle Ford,

no Texas, EUA. Algumas amostras de folhelho do Membro Assistência apresentam composição muito similar ao folhelho da Fm. Niobrara, no Colorado, EUA, enquanto outras são um pouco mais ou menos quartzosas do que esse folhelho produtor de gás natural nos EUA. A amostra 446, com menor proporção de quartzo, situa-se entre os folhelhos das formações Niobrara (EUA) e Vaca Muerta (Argentina) na proporção de carbonatos e filossilicatos. Já o folhelho do Mb. Assistência proveniente de São Mateus do Sul/PR apresenta composição mineralógica próxima aos folhelhos produtores das formações Longmaxi, na China, e Haynesville, no Texas, EUA. As demais amostras da Formação Irati analisadas e plotadas no gráfico da Figura 28 são empobrecidas em carbonatos quando comparadas aos folhelhos produtores internacionais, ainda que tenham teores similares de quartzo, feldspato e filossilicatos aos folhelhos das formações Marcellus e Bakken, 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).

5. DISCUSSÕES

Com base nos resultados geológicos e mineralógicos obtidos, é possível discutir as características de plays de gás de folhelho em países produtores via extração não convencional e na Fm. Irati. Alicerçado em revisão bibliográfica de documentos similares, é possível identificar parâmetros geológicos, mineralógicos e geoquímicos relevantes para comparações, como idade geológica, ambiente deposicional, área (em km²), profundidade (m), espessura média da camada de interesse (m), litologia, mineralogia, COT médio (%), para estabelecer uma analogia segura (ANDREWS, 2013) e (CHARPENTIER; COOK, 2010). A tabela a seguir resume os resultados encontrados para campos norte-americanos de Barnett, Eagle Ford e Marcellus, além de campos produtores no Canadá (Fm. Muskwa), Argentina (Fm. Vaca Muerta) e China (Fm. Longmaxi), para comparação com as características da Fm. Irati. Esses campos foram escolhidos como referências importantes na produção mundial ou local de gás de folhelho, com dados disponíveis na literatura. Importante destacar que para a Fm. Irati, foram criadas duas colunas: uma com dados da literatura e outra com base nos resultados dos subcapítulos anteriores.

Tabela 4 – Dados geológicos e mineralógicos da Fm. Irati e de algumas formações geológicas já produtoras de gás de folhelho no exterior

Folhelho produtor de gás natural	Barnett	Eagle Ford	Marcellus	Fm. Muskwa	Fm. V. Muerta	Fm. Longmaxi	Fm. Irati (baseado na literatura)	Fm. Irati (baseado nos resultados obtidos)
país	EUA	EUA	EUA	Canadá	Argentina	China	Brasil	
Estado/província	Texas	Texas	Pensilvânia	Alberta	Neuquén	Sul da China	Goiás a Rio Grande do Sul	
idade geológica	Carbonífero	Cretáceo	Devoniano	Devoniano	Jurássica	Siluriano	Permiano	
ambiente deposicional	Marinho	Marinho	Marinho	Marinho	Marinho	Marinho	Marinho	Marinho Restrito
bacia	Forth Worth	Texan Maverick	Appalachian	Horn River	Neuquén	Sichuan	Paraná	
tipo de bacia	Foreland	Rift	Foreland	Foreland	Foreland	Intracratônica	Intracratônica	
área (km²)	13.000	5.000	246.000	8.600	30.000	260.000	770.000	
profundidade (m)	2300	2100	1900	2400	2400	3300	2100	
espessura média (m)	91,4	61,0	38,1	115,8	99,1	85,3	50	37
litologia	folhelhos negros, rochas carbonáticas	folhelhos carbonosos ricos em matéria orgânica; carbonatos petrolíferos e fossilíferos também enriquecidos em matéria orgânica.	folhelhos negros com concreções carbonáticas	rico em sílica, folhelho siltoso e calcário variável	alternância rítmica de calcários micríticos, margas (calcários micríticos argilosos) e pelitos (argilitos, argilitos carbonáticos)	folhelhos silicosos, ricos em matéria orgânica, folhelhos carbonáticos, folhelhos siltosos, lamito cinza e siltito	argilitos cinza-escuro a pretos, folhelhos negros carbonosos e betuminosos, com intercalações de calcários e sílex nodular	folhelho preto, pirobetuminosos, com intercalações de calcários e presença de sill de diabásio
mineralogia	argilominerais 30%, carbonatos 20%, quartzo 50%	argilominerais 15-30% sílica 15-20%; carbonatos 40-90%	argilominerais 40%, carbonatos 8%, quartzo 50%	argilominerais ~16%, carbonatos 10%, quartzo 26 - 87%	argilominerais ~22%, carbonatos 33%, quartzo 45,5%	argilominerais 15 - 46%, carbonatos 31,36%, quartzo 30,5%	argilominerais 45%, quartzo 50%	argilominerais 35,7%, carbonatos 15,4%, quartzo 48,8%

tipo de querogênio (predominante)	II	I - II	II - III	II	I - II	I - II	I - II
COT médio (%)	3,0 - 6,0	4,25	12	3,5	4	3	0,04 a 21

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Aboarrage e Lopes (1986), Alexander (2015), Alsalem et al. (2016), Araújo et al. (2000), Askenazi et al. (2013), Cardneaux (2021), Chong et al. ⁴ (2010, apud Euzen, 2011), Dong et al. (2018), Ferri et al. (2014), Hall et al. (2011), Hentz e Ruppel (2011), Li et al. (2016), Liu et al. (2021), Luo et al. (2020), Ramos e Formoso (1975), Rezaee et al. (2015), Rocha (2016), Sales e Sosa (2013), Silva (2007), Tassinari et al. (2021) e Wilson (2019).

⁴ CHONG, K. K.; GRIESER, W. V.; PASSMAN, A.; TAMAYO, H. C.; MODELAND, N.; BURKE, B. E. **A completion guidebook to shale-play development: A review of successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades.** In: Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Society of Petroleum Engineers, 2010.

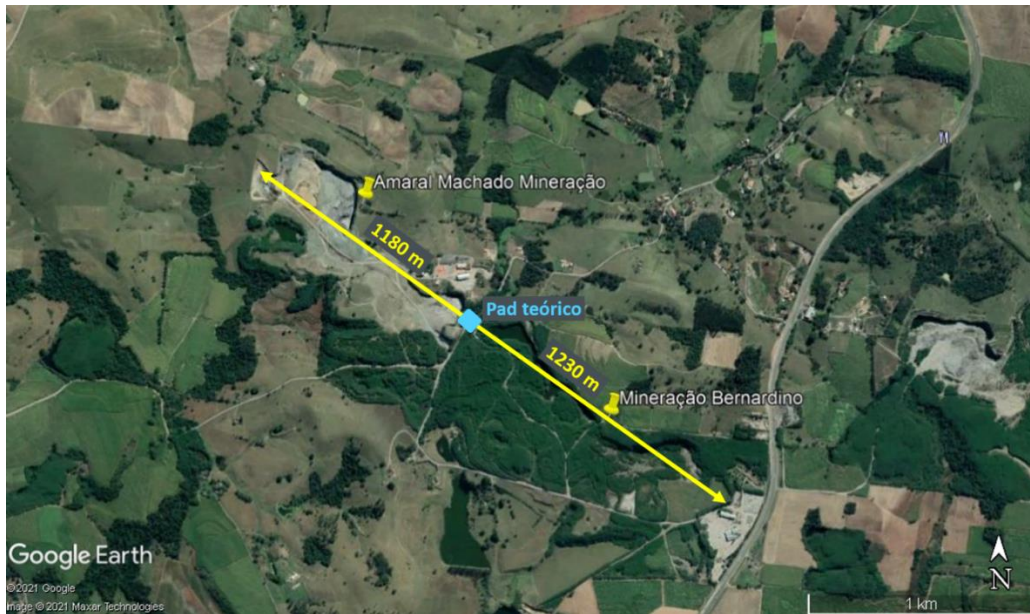
Com base na tabela acima, é possível comparar a Fm. Irati com outros *plays* produtores. Algumas características são semelhantes a esses campos produtores, enquanto outras nem tanto. Essa análise é abordada nos subitens a seguir.

- (i) Comparada com formações produtoras, a Fm. Irati apresenta idade geológica distinta (permiana), mesmo ambiente sedimentar (marinho) e litologias comuns, mas se diferencia pela presença de sills intercalados. A idade geológica da Fm. Irati é distinta das outras formações da Tabela 4, e o tipo de bacia sedimentar é similar apenas à Bacia de Sichuan, onde ocorre a Fm. Longmaxi (China).
- (ii) A Fm. Irati e a Fm. Longmaxi possuem grande área de ocorrência, enquanto outros campos possuem áreas mais restritas, possivelmente devido à deposição em bacia intracratônica.
- (iii) A profundidade máxima de 2100 da Fm. Irati é semelhante à dos campos analisados (ARAÚJO, et al., 2000);
- (iv) A Fm. Irati tem uma das menores espessuras médias entre as formações da Tabela 4, exceto pelo campo de Marcellus.
- (v) O tipo de querogênio predominante, tipo I e II, é semelhante a outras formações (ANDREWS, 2013);
- (vi) A Fm. Irati possui ampla variação na porcentagem de COT, que varia de 0,04 a 21%. O valor mínimo de 2% de COT na prospecção de hidrocarbonetos não convencionais é atendido pela Fm. Irati, segundo Rezaee et al. (2015).
- (vii) A literatura não considera a presença de carbonatos na mineralogia da Fm. Irati, mas as amostras analisadas nesta pesquisa apresentaram teores médios de 15% de calcita/dolomita, especialmente nos folhelhos de São Mateus do Sul/PR. A presença de carbonatos permitiu uma descrição litológica mais detalhada, diferenciando os folhelhos em silicáticos e carbonáticos.
- (viii) A composição mineralógica identificada nos folhelhos analisados do Mb. Assistência concorda com aquelas descritas por Ramos e Formoso (1975) para poços de sondagem na Bacia do Paraná, incluindo a presença de argilominerais magnesianos como a corrensitita. Concorda ainda com Ribas (2012), que analisou amostras da frente de lavra da Petrobras (Petrosix) em São Mateus do Sul, quando afirma que a mineralogia normalmente

encontrada nos folhelhos pirobetuminosos é especialmente formada por quartzo, feldspato, pirita além de argilominerais;

- (ix) A literatura indica que os teores de quartzo na Fm. Irati são em média cerca de 50% (TASSINARI, et al., 2021), o que está de acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa para a soma de quartzo e feldspato (valor médio de 48%), e é maior do que a proporção obtida apenas para quartzo. Esses teores mais elevados de quartzo indicam uma maior fracabilidade do folhelho, consequentemente, uma maior propensão ao fraturamento hidráulico. Além disso, na Fm. Irati, a intercalação dos folhelhos com camadas de dolomito, que contêm em média 7,8% de filossilicatos e 22% de quartzo e feldspato, pode propiciar a abertura de fraturas;
- (x) A Fm. Serra Alta não deve interferir na qualidade do desvio do poço, já que sua composição silicática não apresenta características que afetem o desvio. É nessa formação que o kick-off ocorrerá, o que a torna importante para o desvio do poço de uma trajetória vertical para uma trajetória horizontal.
- (xi) Com base nos dados levantados para distâncias perfuradas horizontalmente em alguns dos principais plays dos EUA, que variam entre 1200 e 2100 m, pode-se inferir que o Mb. Assistência da Fm. Irati permite a perfuração horizontal em uma ordem de magnitude semelhante, considerando as extensões das frentes de lavra observadas no campo e imagens aéreas das minerações no estado de SP, conforme ilustrado na Figura 29 por um exercício teórico de localização hipotética de pad e perfurações horizontais em um eixo NW-SE com extensões mínimas de 1180 m a noroeste e 1230 m a sudeste. Esses números se mostram condizente com as dimensões já particadas, embora sejam apenas uma representação experimental teórica, uma vez que as frentes de lavra ativa da Mineração Amaral Machado e inativa da Mineração Bernardino estão na superfície.

Figura 29 – Imagem aérea da Mineração Amaral Machado e Bernadino em Saltinho/SP com locação hipotética de *pad* teórico e perfurações horizontais com extensões mínimas de 1180 m a noroeste e 1230 m a sudeste



Fonte: Imagem modificada pelo autor a partir de Google Earth.

Outro aspecto relevante é o fraturamento hidráulico e seus problemas ambientais, que não podem ser ignorados em discussões dessa magnitude. Conforme indicado nesta pesquisa, a extração do gás de folhelho é um tema controverso em termos ambientais, devido às emissões de CO₂ para a atmosfera, ao alto consumo de água no processo de fraturamento (EPA, 2010) e à possibilidade de contaminação de aquíferos, entre outros fatores (JACKSON, et al., 2013).

6. CONCLUSÕES

Os possíveis impactos do desenvolvimento de estrutura para prospecção e produção do gás de folhelho podem ser desafiadores, com um caminho em tanto quanto árduo nesse sentido.

Por outro lado, é necessário diversificar a oferta interna de energia no Brasil, a médio e longo prazo, e a pesquisa científica deve se antecipar nesse tema, "jogando" luz sobre essa discussão.

Sob esse prisma, o gás natural obtido de folhelhos surge como candidato para ser elemento de transição para uma matriz energética mais limpa e sustentável, conciliando aspectos econômicos e ambientais favoráveis em comparação com outras fontes não renováveis.

Esta pesquisa demonstrou que os folhelhos da Formação Irati apresentam uma boa fracionabilidade em comparação com outras unidades geológicas em países produtores, devido à sua composição mineralógica. Apesar de sua espessura ser mais restrita, o que torna a perfuração horizontal e extração de recursos energéticos por meio de fraturamento hidráulico um pouco mais difícil, a Formação Irati é uma das principais fontes de gás de folhelho na Bacia do Paraná, com uma litologia complexa e variações significativas em sua composição mineralógica. Com base nessa mineralogia, pode-se inferir que a determinação do "kick-off point" deve ser feita localmente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOARRAGE, A. M.; LOPES, R. C. **Projeto a Borda Leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica**. DNPM/CPRM, Porto Alegre. 18 v. Unpublished, 1986.

ALEXANDER, M. **A new look at maverick Basin basement tectonics**. Bulletin of the South Texas Geological Society, pp. 32-45. 2015.

ANDREWS, Ian J. **The Carboniferous Bowland Shale gas study: geology and resource estimation**. 2013.

ASKENAZI, A.; BISCAYART, P.; CÁNEVA, M.; MONTENEGRO, S.; MORENO, M. **Analogía entre la Formación Vaca Muerta y shale gas/oil plays de EEUU**. Society of Petroleum Engineers (SPE), 2013.

CHARPENTIER, Ronald R.; COOK, Troy A. **Improved USGS methodology for assessing continuous petroleum resources**. US Geological Survey Data Series, v. 547, n. 2, p. 22, 2010.

CHONG, K. K.; GRIESER, W. V.; PASSMAN, A.; TAMAYO, H. C.; MODELAND, N.; BURKE, B. E. **A completion guidebook to shale-play development: A review of successful approaches toward shale-play stimulation in the last two decades**. In: Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference. Society of Petroleum Engineers, 2010.

____. CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa das Bacias Sedimentares Brasileiras**. in disponível em: <<https://gismaps.com.br/downloads/sedimentary-basins/>>. Último acesso em 19 de setembro de 2020. 2016.

EIA – U.S. Energy Information Administration. **Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States**. 2013.

EIA – U.S. Energy Information Administration. **Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: Canada**. 2015.

____.EPA – United States Environmental Protection Agency. **Scoping materials for initial design of EPA research study on potential relationships between hydraulic fracturing and drinking water resources**. Disponível em: <[http://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/0/3B745430D624ED3B852576D400514B76/\\$File/Hydraulic+Frac+Scoping+Doc+for+SAB-3-22-10+Final.pdf](http://yosemite.epa.gov/sab/sabproduct.nsf/0/3B745430D624ED3B852576D400514B76/$File/Hydraulic+Frac+Scoping+Doc+for+SAB-3-22-10+Final.pdf)>. Último acesso em 23 de maio de 2020. 2010.

____.EPA – United States Environmental Protection Agency. **The Process of Unconventional Natural Gas Production**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/uog/process-unconventional-natural-gas-production>>. Último acesso em 03 de maio de 2021.

FERRI, Filippo; GRIFFITHS, Matthew. **Thermal maturity and regional distribution of the Muskwa Formation, northeastern British Columbia**. Science Reports, p. 37-45, 2014.

HACHIRO, Jorge. **Litotipos, associações faciológicas e sistemas deposicionais da Formação Irati no Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 1991.

HALL, Craig D.; JENNINGS, Debra; MILLER, Randy. **Comparison of the reservoir properties of the Muskwa (Horn River Formation) with other North American gas shales**. CSPG/CSEB/CWLS GeoConvention. 2011.

____. IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector**. Paris: International Energy Agency, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>>. Último acesso em: 26 de março de 2023.

____. IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)**. Disponível em: <https://report.ipcc.ch/ar6syr/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf>. Último acesso em 26 de março de 2023.

JACKSON, R. E.; GORODY, A. W.; MAYER, B.; ROY, J.W.; RYAN M.C.; VAN STEMPVOORT D.R. **Groundwater protection and unconventional gas extraction: The critical need for field-based hydrogeological research**, v. 51, n. 4, p. 488-510, 2013.

LIMA, Fábio Palma. Dissertação de mestrado. **Poços horizontais e fraturamento hidráulico na Formação Irati, Bacia do Paraná. Uma análise a luz da experiência dos países produtores**. Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. 2021.

LIU, Shanyong; LI, Lin; YUAN, Yuan; LOU, Yishan; LI, Zhonghui. **A New Fracability Evaluation Approach for Shale Reservoirs Based on Multivariate Analysis: A Case Study in**

Zhaotong Shale Gas Demonstration Zone in Sichuan, China. Acta Geologica Sinica-English Edition, v. 93, n. 4, p. 1005-1014. 2019.

LIU, S.; YANG, Y.; DENG, B.; ZHONG, Y.; WEN, L.; SUN, W.; LI, Z.; JANSÁ, L.; LI, J.; SONG, J.; ZHANG, X.; PENG, H. **Tectonic evolution of the Sichuan Basin, Southwest China.** Earth-Science Reviews 213: 103470. 2021.

LUO, C.; YIN, N.; LIN, H.; GAO, X.; WANG, J.; ZHU, H. **Reservoir Characteristics of the Lower Silurian Longmaxi Shale in Zhaotong Region, Southern China.** Geofluids, v. 2020, 2020.

MAIR, R; BICKLE, M; GOODMAN, D; KOPPELMAN, B; ROBERTS, J; SELLEY, R; SHIPTON, Z; THOMAS, H; WALKER, A; WOODS, E; YOUNGER, P.L. **Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing.** Royal Society and Royal Academy of Engineering, London. 76pp. 2012.

MILANI, E. J.; MELO, J. E.; SOUZA, P.A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A.B. **Bacia do Paraná.** Bol. Geociências Petrobras 15(2):265-287. 2007.

____. MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. **Banco de Informações de Transportes - BIT.** Disponível em: <<http://transportes.gov.br/bit/63-bit/5124-bitpublic.html#mapduto>>. Último acesso em 28 de julho de 2020.

____. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim mensal de acompanhamento da Indústria de Gás Natural.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-bicombustiveis/publicacoes-1/boletim-mensal-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural/2022-2/12-boletim-de-acompanhamento-da-industria-de-gas-natural-dezembro-de-2022.pdf/view>>. 2022.

____. MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2050.** Brasília, DF: Ministério de Minas e Energia, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/energia-eletrica/plano-nacional-de-energia-pne-2050>. 2020.

MIT – Massachusetts Institute of Technology. **The Future of Natural Gas: An Interdisciplinary MIT Study.** Boston, 2011.

MOORE, D.M.; REYNOLDS Jr., R.C.. **X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals.** Oxford University, New York, 1997.

NORTHFLEET, A. A.; MEDEIROS, R. A.; MUHLMANN, H. **Reavaliação dos dados geológicos da Bacia do Paraná.** Boletim Técnico da Petrobrás, v. 12, n. 3, p. 291-346, 1969.

PADULA, Vicente Tomazelli. **Estudos geológicos da Formação Irati, sul do Brasil.** Boletim Técnico da Petrobrás, v. 11, n. 3, p. 407-430, 1968.

PETERS, K. E; XIA, X; POMERANTZ, A.E; MULLINS, O.C. **Geochemistry applied to evaluation of unconventional resources**. In: Unconventional oil and gas resources handbook. Gulf Professional Publishing. p. 71-126. 2016.

RAMOS, Adriano Nunes; FORMOSO, Milton Luiz Laquintinie. **Argilominerais das rochas sedimentares da Bacia do Paraná**. PETROBRAS, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Divisão de Informação Técnica e Patentes, 1975.

REATE 2020. **Comitê para Revitalização das Atividades de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural em Áreas Terrestres. Relatório Subcomitê Potencial de Petróleo e Gás Onshore. Resumo Bibliográfico das Bacias Onshore**. 2020.

REZAEI, Reza; ROTHWELL, Mark. **Gas Shale: Global Significance, Distribution, and Challenges**. In REZAEI, Reza. **Fundamentals of gas shale reservoirs**. John Wiley; Sons, 2015.

RICCOMINI, Claudio; SANT'ANNA, Lucy; TASSINARI, Colombo; TAIOLI, Fábio. **O petróleo no Brasil**. In: MELFI, Adolpho José et al. Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. 2016.

ROCHA, Haline de Vasconcellos. Dissertação de mestrado. **Estudo geológico do potencial de exploração e produção de gás natural não convencional na bacia do Paraná: avaliação da viabilidade no abastecimento da usina termoeletrica de Uruguaiana (RS)**. Programa de Pós-Graduação em Energia, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (PPGE/IEE/USP). 2016.

SALES, T.; SOSA, A. **Maduración. avances del conocimiento de las Formaciones Los Molles y Vaca Muerta como shale plays. ¿Qué sabemos de estas formaciones, qué nos aún falta por conocer y que nos pueden aportar sus análogos para ello?** SPE International. 2013.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A.A. **REVISÃO ESTRATIGRÁFICA DA BACIA DO PARANÁ**. ANAIS DO XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia. Ed. SBG. Porto Alegre. v.I, p. 41-65. 1974.

SILVA, C.G.A., **Caracterização Geoquímica Orgânica das Rochas Geradoras de Petróleo das Formações Irati e Ponta Grossa da Bacia do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2007.

TASSINARI, Colombo; SAN MARTIN, Stephanie; RICCOMINI, Claudio; TAIOLI, Fábio. **Potencial de exploração de não-convencionais – Estado de São Paulo**. In: FGV Energia. O desenvolvimento da exploração de recursos não-convencionais no Brasil: novas óticas de desenvolvimento regional. 2021.

ZALÁN, P.V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J.C.J.; MARQUES, A.; ASTOLFI, M.A.M.; VIEIRA, I.S.; APPI, V.T.; ZANOTTO, O.A. 1990. **The Paraná Basin, Brazil**. In: DE RAJA GABAGLIA, G.P. ; MILANI, E.J. (coords.). Origem e evolução de bacias sedimentares. PETROBRÁS, Rio de Janeiro, p.135-168. 1990.