



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Raissa da Silva Lessa

**Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de
hidrocarbonetos em uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia
do Parnaíba**

Rio de Janeiro

2021

Raissa da Silva Lessa

**Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos em
uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias.

Orientador: Dr. Sergio Bergamaschi

Rio de Janeiro
2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/C

L638 Lessa, Raissa da Silva.
Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos em uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. / Raissa da Silva Lessa – 2021.
126 f. : il.

Orientador: Sergio Bergamaschi
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Geologia estratigráfica – Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA) – Devoniano – Teses. 2. Recursos minerais – Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA) – Teses. 3. Rochas – Formação mineral – Parnaíba, Rio, Bacia (PI e MA) – Teses. 4. Hidrocarbonetos – Teses. 5. Petrologia – Teses. I. Bergamaschi, Sergio. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 551.243.1(815.3)

Bibliotecária responsável: Fernanda Lobo / CRB-7: 5265

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Raissa da Silva Lessa

Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos em uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Análise de Bacias

Aprovada em 16 de dezembro de 2021.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Bergamaschi
Faculdade de Geologia – UERJ

Banca Examinadora:

Prof. Dr. René Rodrigues
Faculdade de Geologia - UERJ

Dra. Fernanda Setta Duarte
Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade

Dra. Loren Pinto Martins
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rio de Janeiro
2021

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de render graças ao meu Deus por tamanha bondade, misericórdia e cuidado. Obrigado, meu Senhor, por me manter de pé e ter me sustentado até hoje!

Agradeço ao meu orientador Dr. Sergio Bergamaschi por todos ensinamentos, por toda ajuda e pela oportunidade que me concedeu para ingressar em um incrível projeto, além de aprender e de descobrir sobre o mundo da Estratigrafia.

Agradeço aos professores presente na minha banca por cada correção, cada ideia, cada ajuda, cada conhecimento compartilhado e por serem tão prestativos ao longo do meu tempo no mestrado.

Agradeço ao pós-graduação da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, desde da secretaria, professores e coordenação, que sempre foram solidários, corretos e presentes, principalmente, desde a deflagração da pandemia do Covid-19.

Agradeço a Agência Nacional de Petróleo que, por meio do Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH 28.1), me ajudou a prosseguir no mestrado dando auxílio financeiro.

Agradeço a minha família por ter me amparado e ter me ajudado a realizar meu grande objetivo após a graduação que é me tornar Mestre em Geociências.

Agradeço aos meus amigos por terem me ajudado ao longo dessa pesquisa, seja se fazendo presentes, seja oferecendo ajuda, seja sonhando junto comigo e, sobretudo, por não me permitirem desistir.

Eu sou uma das provas vivas que a ciência faz diferença, pois sou diagnosticada com Esclerose Múltipla. Ao longo desses 2 anos de mestrado, foram 3 surtos e 4 internações. Hoje devo gratidão a Deus e, também, a profissionais que continuam fazendo pesquisa, estudando, criando formas de ajudar e cuidar de pessoas “raras” e que, principalmente, enxergam no estudo a possibilidade de resolver problemas no mundo, ultrapassam a pouca valorização do papel fundamental a qual a ciência possui, especialmente, no Brasil. Muito obrigado a cada profissional de N área de estudo e que ainda insistem em “fazer ciência”. Graças a vocês, pessoas como eu, ganham sobrevida com o avanço de medicações, descobriu-se o pré-sal, descobriu-se novas tecnologias e novas fontes de energia, descobriu-se como diminuir efeitos drásticos da poluição, descobriu-se novas vacinas e ajudam o nosso país a se desenvolver de N maneiras.

Seja imparável! (Re)Desistir sempre.

A autora

RESUMO

LESSA, Raissa da Silva. *Arcabouço estratigráfico e possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos em uma seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba*. 2021. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

A Bacia do Parnaíba está localizada, parcialmente, em três regiões do território brasileiro - norte, nordeste e centro-oeste -, que inclui porções dos estados do Ceará, Piauí, Maranhão, Pará e Tocantins, cobrindo uma área de, aproximadamente, 600.000 km². As unidades estratigráficas que preenchem a Bacia estão dispostas em três grandes ciclos, quais sejam: continental-marinho-continental de idade neo-ordoviciano a eocarbonífera; o segundo, sedimentos terrígenos do Neocarbonífero ao Jurássico; e o terceiro, relacionado à fase rifte no Neocretáceo. O material desse estudo abrangeu dois poços, com testemunhagem contínua, quais sejam: GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO. Nesses poços, foram recuperados testemunhos de toda a seção das formações Itaim e Pimenteiras, além da seção mais superior da Formação Jaicós. Esses poços abrangem, sobretudo, a Formação Pimenteiras, parcialmente a Formação Itaim e, excepcionalmente, no segundo poço, há o topo da Formação Jaicós. A Formação Itaim é composta, primordialmente, por arenitos finos a médio, raramente grossos, e, localmente, folhelhos. Já a Formação Pimenteiras consiste, predominantemente, em folhelhos cinza escuros a pretos, podendo ocorrer intercalados com camadas de siltitos e arenitos. Nos testemunhos de sondagem estudados, foi possível realizar a análise faciológica, determinação de paleoambientes deposicionais, caracterização quimioestratigráfica na Formação Itaim, no poço 2, com suporte de dados provenientes de análises geoquímicas (Carbono Orgânico Total e Pirólise), além de descrição dos folhelhos radioativos na Formação Pimenteiras, conhecidos como, A, B e C e descritos por Rodrigues (1995). A última formação possui intervalos potencialmente geradores de hidrocarbonetos associados a superfície de inundação máxima no Devoniano, esses intervalos são de interesse para exploração, uma vez que dos Folhelhos mencionados, B e C atingiram, respectivamente, cerca de 17 m e 38 m de espessura, com COT médio de 2,3% e 2,4%, respectivamente. O folhelho A é o nível com menor teor médio de COT (0,68%), sugerindo assim, que os dois primeiros níveis supracitados tenham favorabilidade para geração de hidrocarbonetos.

Palavras-chave: Formação Pimenteiras. Sistema petrolífero. Hidrocarbonetos. Devoniano.

ABSTRACT

LESSA, Raissa da Silva. *Stratigraphic framework and potential hydrocarbon generating horizons at devonian section from the southwestern boundary, Parnaíba Basin, Brazil*. 2021. 126 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

The Parnaíba Basin is located, partially, in three regions of the Brazilian territory - North, Northeast and Center-West - which it includes portions of the following states: Ceará, Piauí, Maranhão, Pará and Tocantins, encompassing an area about 600,000 km². The stratigraphic units that cover the Basin are arranged in three major cycles, namely: the continental-marine-continental sequence of neo-ordovician to eocarboniferous age; the second, terrigenous sediments deposited at Neocarboniferous to Jurassic; and the third the rift phase of late cretaceous. The material of this study covered two wells in continuous cores: GASBRAS-1-RS-TO and GASBRAS-2-RS-TO, these wells enclose the Itaim and Pimenteiras Formations, and, partially, the top of the Jaicós Formation. The Itaim Formation is comprised of fine to medium sandstones, rarely coarse, and locally shales. The Pimenteiras Formation, on the other hand, consists, predominantly, of dark grey to black shales, which may occur interspersed with siltstone and sandstone layers. At cores studies, it was possible to carry out faciological analysis, determination of depositional paleoenvironments, chemostratigraphic characterization at the Itaim Formation, in well 2, supported by data from geochemical analyzes (Total Organic Carbon and Pyrolysis), as well as description of those within the Pimenteiras Formation of the radioactive shales, known as: A, B and C. The last Formation has potentially hydrocarbon generating intervals arising from maximum flooding surfaces in the Devonian. These intervals are of interest for exploration, since from the mentioned shales, B and C, reached, respectively, about 17 m and 38 m in thick, with an average TOC of 2.3% and 2.4%. The shale A is the level with the lowest average TOC content (0.68%), thus it is suggesting, that the first two levels mentioned above it has favorability for to generation of hydrocarbons.

Keywords: Pimenteiras Formation. Petroleum system. Hydrocarbons. Devonian.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Localização da Bacia do Parnaíba.....	22
Figura 2 –	Mapa mostrando a espessura de litosferas continentais terrestres, evidenciando as 24 Bacias cratônicas do mundo, com destaque para a Bacia do Parnaíba.....	23
Figura 3 –	Distribuição do magmatismo aflorante na Bacia do Parnaíba.....	24
Figura 4 –	Ilustração da estruturação esquemática da Bacia do Parnaíba.....	25
Figura 5 –	Carta Estratigráfica do Paleozoico da Bacia do Parnaíba.....	27
Figura 6 –	Mapa de Localização dos Poços 1 (verde) e 2 (azul) no Município de Rio Sono, Tocantins, Brasil.....	38
Figura 7 –	Diagrama ternário o qual sugere a interação entre os três fatores complexos principais (eustasia, tectônica e aporte sedimentar) na construção das sequências deposicionais durante o tempo geológico.....	40
Figura 8 –	Diagrama tipo van Krevelen.....	45
Figura 9 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO.....	50
Figura 10 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO	51
Figura 11 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS- TO.....	51
Figura 12 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS- TO.....	52
Figura 13 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO	52
Figura 14 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO	53
Figura 15 –	Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO	54
Figura 16 –	Exemplos de litologias encontradas nas Formações estudadas, tais como: Fm. Pimenteiras; Fm. Itaim e Fm. Jaicós.....	55
Figura 17 –	Tipos de estratificações encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO	55
Figura 18 –	Estruturas encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO.....	56
Figura 19 –	Tipos de estratificações encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO, a saber: HCS; heterolíticas (WCL?); heterolíticas (WCL?); e truncamento de baixo ângulo (HCS)	56
Figura 20 –	Estruturas encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO.....	57
Figura 21 –	Fósseis de Braquiópodes indeterminados (?) encontrados no poço	

	GASBRAS-1-RS-TO.....	57
Figura 22 –	Icnofósseis indeterminados (?) encontrados no poço GASBRAS-1-RS-TO.....	58
Figura 23 –	Correlação entre litologia e geoquímica do poço GASBRAS-1-RS-TO..	60
Figura 24 –	Correlação entre litologia e geoquímica do poço GASBRAS-2-RS-TO..	61
Figura 25 –	Folhelhos geradores encontrados no poço GASBRAS-1-RS-TO, sendo: a) Folhelho A em 230,8 m; b) Folhelho B em 164,7 m; e c) Folhelho C em 106,5 m.....	63
Figura 26 –	Folhelhos geradores encontrados no poço GASBRAS-2-RS-TO, sendo: a) Folhelho A em 203,8 m; b) Folhelho B em 127,8 m; e c) Folhelho C em 67,8 m.....	64
Figura 27 –	Resultados de COT e pirólise parcial do poço GASBRAS-2-RS-TO.....	67
Figura 28 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade A.....	69
Figura 29 –	Diagrama IH x COT.....	69
Figura 30 –	Diagrama S2 x COT.....	70
Figura 31 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade B.....	71
Figura 32 –	Diagrama IH x COT.....	72
Figura 33 –	Diagrama S2 x COT.....	72
Figura 34 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade C.....	74
Figura 35 –	Diagrama IH x COT.....	74
Figura 36 –	Diagrama S2 x COT.....	75
Figura 37 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade D.....	76
Figura 38 –	Diagrama IH x COT.....	77
Figura 39 –	Diagrama S2 x COT.....	77
Figura 40 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade E.....	79
Figura 41 –	Diagrama IH x COT.....	79
Figura 42 –	Diagrama S2 x COT.....	80
Figura 43 –	Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade F.....	81
Figura 44 –	Diagrama IH x COT.....	82
Figura 45 –	Diagrama S2 x COT.....	82
Figura 46 –	Modelo deposicional para Fm. Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO.....	85
Figura 47 –	Relação COT x S dos folhelhos encontrados no poço GASBRAS-2-RS-	86

	TO.....	
Figura 48 –	Relação COT x S do folhelho A com as subunidades dos folhelhos B e C no poço GASBRAS-2-RS-TO. A seta roxa evidencia o aumento da taxa de anoxia do folhelho A até o C.....	87
Figura 49 –	Desenho esquemático contendo sistemas deposicionais atuantes. As setas menores (em azul) destacam o movimento em períodos curtos; já as setas maiores apontam para o movimento geral, sendo para a direita (transgressivo) e para esquerda (regressivo).....	90
Figura 50 –	Ilustração com a localização dos poços utilizados na correlação geológica.....	91
Figura 51 –	Correlação dos Folhelhos A, B e C com poços adjacentes aos objetos de estudo.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre T _{máx} e estágio de maturação térmica.....	44
Tabela 2 – Relação entre os valores do pico S2 e a classificação de potencial associado.....	46
Tabela 3 – Relação entre os valores de IH e e o tipo de hidrocarbonetos gerados.....	46
Tabela 4 – Fácies sedimentares definidas para os testemunhos de sondagem GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO, onde NBOT é nível de base de ondas de tempestade e NBON é nível de base de ondas normais.....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
DEPA	Departamento de Estratigrafia e Paleontologia
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
PRH	Programa de Formação de Recursos Humanos
LGQM	Laboratório de Geoquímica
Ma	Milhares de anos
m	metros
Ca	Cerca de
COT	Carbono Orgânico Total
RI	Resíduo Insolúvel
S	Enxofre Total
UTM	Universal Transversa de Mercator
IH	Índice de Hidrogênio
IO	Índice de Oxigênio
HCS	Estratificação Cruzada por Ondas (Hummocky)
WCL	Estratificação Cruzada e Ondulante
NBON	Nível Base de Ondas Normais
NBOT	Nível Base de Ondas de Tempestade
SIM	Superfície de Inundação Máxima
Fm.	Formação
TSMA	Trato de Sistema de Mar Alto
TST	Trato de Sistema Transgressivo
TSMB	Trato de Sistema de Mar Baixo
ST	Superfície Transgressiva

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	18
1	OBJETIVOS	21
1.1	Objetivo Geral	21
1.2	Objetivos Específicos	21
2	CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA DO PARNAÍBA	22
2.1	Localização	22
2.2	Evolução Tectono-Sedimentar	23
2.3	Estruturação da Bacia	24
2.4	Estratigrafia	25
2.4.1	<u>Sequência Siluriana</u>	28
2.4.2	<u>Sequência Mesodevoniana Eocarbonífera</u>	28
2.4.3	<u>Sequência Neocarbonífera – Eotriássica</u>	30
2.4.4	<u>Sequência Jurássica</u>	31
2.4.5	<u>Sequência Cretácea</u>	32
2.5	Formação Pimenteiras	33
2.6	Caracterização Geoquímica	34
2.7	Estratigrafia de Sequências	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	Localização dos Poços	38
3.2	Análise de Fácies Sedimentares e Análise Estratigráfica	39
3.3	Análise de Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre Total (S) e Resíduo Insolúvel (RI)	41
3.4	Pirólise Rock-Eval	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Fácies Sedimentares	47
4.2	Estruturas e Litologias	54
4.3	Geoquímica	58
4.3.1	<u>Carbono Orgânico Total (COT)</u>	58
4.3.2	<u>Resíduo Insolúvel (RI)</u>	64
4.3.3	<u>Enxofre Total (S)</u>	65
4.3.4	<u>Pirólise Rock Eval</u>	66

4.3.4.1	Unidade A.....	68
4.3.4.2	Unidade B.....	70
4.3.4.3	Unidade C.....	73
4.3.4.4	Unidade D.....	75
4.3.4.5	Unidade E.....	78
4.3.4.6	Unidade F.....	80
4.4	Ambiente Depositional	83
4.4.1	<u>Fm Jaicós e Fm. Itaim</u>	83
4.4.2	<u>Fm. Pimenteiras</u>	84
4.4.2.1	<u>Relação COT x S nos Folhelhos A, B e C</u>	85
4.5	Análise Estratigráfica	87
4.6	Correlação com Poços Adjacentes	91
	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICE A – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 283,8 m a 256,90 m (superior) e de 256,90m a 228,90 m (inferior).....	100
	APÊNDICE B – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 217 m a 200,90 m (superior) e de 204,90 m a 172,90 m (inferior).....	101
	APÊNDICE C – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 172,90m a 145,30m (superior) e de 145,30 m a 117,60 m (inferior).....	102
	APÊNDICE D – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 117,60 m a 90,40 m (superior) e de 90,40 m a 64 m (inferior).....	103
	APÊNDICE E – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 64 m a 37 m (superior) e de 37 m a 3,50 m (inferior).....	104
	APÊNDICE F – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 334,80 m a 301,80 m (superior) e de 301,80 m a 273,20 m (inferior).....	105
	APÊNDICE G – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 273,20 m a 242 m (superior) e de 242 m a 209 m (inferior).....	106
	APÊNDICE H – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 209 m a 176,50 m (superior) e de 176,50 m a 143,30 m (inferior).....	107
	APÊNDICE I – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 143,30 m a 111,30 m (superior) e de 111,30 m a 79, 30 m (inferior).....	108

APÊNDICE J – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 79,30 m a 47 m (superior) e de 47 m a 15,70 m (inferior).....	109
APÊNDICE K – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 7 m a 36 m	110
APÊNDICE L – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 37 m a 72 m.....	111
APÊNDICE M – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 73 m a 108 m.....	112
APÊNDICE N – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 109 a 144 m.....	113
APÊNDICE O – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 145 m a 180 m.....	114
APÊNDICE P – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 181 m a 216 m.....	115
APÊNDICE Q – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 217 m a 252 m.....	116
APÊNDICE R – Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 253 m a 283 m.....	117
APÊNDICE S – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 15 m a 46 m.....	118
APÊNDICE T – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 47 m a 82 m.....	119
APÊNDICE U – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 83 m a 118 m.....	120
APÊNDICE V – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 119 m a 154 m.....	121
APÊNDICE W – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 155 m a 190 m.....	122
APÊNDICE X – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 191 m a 226 m.....	123
APÊNDICE Y – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 227 m a 262 m.....	124
APÊNDICE Z – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 263 m a 298 m.....	125

APÊNDICE AA – Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 299 m a
335 m.....

INTRODUÇÃO

A Bacia do Parnaíba ocupa parcialmente três regiões do território brasileiro, norte, nordeste e centro-oeste, compreendendo porções dos estados do Ceará, Piauí, Maranhão, Pará e Tocantins. A mencionada Bacia é considerada intracratônica e possui forma arredondada, em planta, abrangendo uma área aproximada de 600.000 km². Limita-se da Bacia do Amazonas, a oeste, pelo Lineamento Tocantins; a norte, pelo Arco Ferrer Santos; a noroeste, pelo Arco Tocantins; a sul e sudeste, por estruturas cambrianas correlatas a Faixa Brasília; e a leste pela Falha de Tauá (Cunha, 1986).

Segundo Vaz et al. (2007), as unidades estratigráficas da Bacia estão dispostas em três grandes ciclos, quais sejam: o primeiro corresponde à sequência continental-marinho-continental de idade neo-ordoviciana a eocarbonífera, o segundo, separado do primeiro por uma discordância angular, que compreende sedimentos terrígenos que se estendem do Neocarbonífero ao Jurássico e o terceiro, relacionado à fase rifte das bacias marginais brasileiras (cuja idade é neocretácea). Os autores supracitados ainda dividem o arcabouço estratigráfico da Bacia do Parnaíba em supersequências, a saber: Siluriana, Mesodevoniana - Eocarbonífera, Neocarbonífera - Eotriássica, Jurássica e Cretácea.

O preenchimento sedimentar da Bacia é composto, majoritariamente, por siliciclásticos depositados entre os períodos Cambriano e Cretáceo. Ademais, segundo Góes & Feijó (1994) e Vaz et al. (2007), o pacote sedimentar pode atingir até 3.500m no depocentro da referida Bacia.

Em relação às rochas magmáticas encontradas na presente Bacia e que impulsionaram a maturação de rochas sedimentares, Heilbron et al. (2018) apresentam novos dados do leste da Bacia do Parnaíba e definem quatro eventos ígneos fanerozoicos, a saber: Cambriano (508 a 506 Ma), na base, é um evento vulcânico/subvulcânico félsico registrado ao longo do margem sudeste da Bacia; Toarciano (c.a. 181 Ma); Cretáceo/Barremiano (c.a. 126 Ma); e Aptiano (c.a. 118 Ma). A Formação Mosquito é melhor desenvolvida no oeste da Bacia e é correlacionada com o magmatismo que ocorreu no Atlântico Central, é, comumente, relacionada as extensas camadas de basalto. Já a Formação Sardinha, que apresenta um enxame de diques, é dominante a leste e está ligada à abertura do sul Atlântico.

De acordo com Vaz et al. (2007), três sistemas petrolíferos são reconhecidos na Bacia do Parnaíba: Tianguá-Ipu, Pimenteiras-Cabeças e Codó-Cabeças.

Desde da última década, houve uma retomada nas investigações de hidrocarbonetos na Bacia por meio da concessão de blocos exploratórios pela Agência Nacional de Petróleo (ANP). Adicionalmente, a Bacia do Parnaíba é responsável por, aproximadamente, 6% de toda produção nacional de gás natural no território brasileiro. Das 30 instalações com maior produção de gás natural no país, 4 estão localizados na Bacia, a saber: Gavião Branco, Gavião Caboclo, Gavião Real e Gavião Vermelho (ANP, 2020).

Nos últimos anos, a empresa ENEVA vem realizando uma bem sucedida campanha exploratória na Bacia, tendo efetuado descobertas comerciais de hidrocarbonetos no local. Atualmente a ENEVA possui nove campos declarados comerciais, sendo cinco deles em produção (Gavião Real, Gavião Vermelho, Gavião Branco, Gavião Caboclo e Gavião Azul) e quatro em desenvolvimento (Gavião Preto, Gavião Branco Norte, Gavião Tesoura e Gavião Carijó).

De maneira geral, é possível afirmar que a sequência devoniana-carbonífera inferior é considerada o principal alvo exploratório da Bacia. A caracterização estratigráfica e geoquímica detalhada dos intervalos geradores do Devoniano da Bacia do Parnaíba ainda apresenta problemas, devido à má qualidade das amostras de calha e dos poucos testemunhos disponíveis nos intervalos de maior interesse geoquímico.

Apesar dessa Bacia ser um dos focos atuais de exploração, a mesma ainda carece de estudos, especialmente, a borda sudoeste onde há poucos dados na literatura e a atividade exploratória é escassa. Ainda não há um acervo substancial de dados no que tange a estratigrafia e a geoquímica em sequências alvos ao longo da Bacia, principalmente, reunindo métodos complementares os quais possibilitem a definição de intervalos geradores.

A Formação Pimenteiras vem sendo alvo de estudos por ter potencial para geração de hidrocarbonetos e por se acreditar que o intervalo mais apropriado para a geração nesta Bacia inclui as rochas pelíticas do intervalo givetiano/frasniano da Formação Pimenteiras (Rodrigues, 1995). Em geral, os arenitos das Formações Cabeças e Ipu armazenam os hidrocarbonetos originados nas rochas fonte das Formações Pimenteiras e Tianguá, respectivamente.

Por conseguinte, nesse estudo se objetiva promover uma análise robusta do potencial petrolífero para a parte sudoeste da Bacia do Parnaíba, tendo como foco a Formação Pimenteiras. A pesquisa utiliza dados de fácies sedimentares e de geoquímica para delimitar possíveis horizontes geradores em testemunhos de sondagens, a saber: GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO. Tais sondagens foram realizadas no âmbito do Projeto REDE

GASBRAS, em desenvolvimento por pesquisadores do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia (DEPA)/UERJ e tem apoio financeiro pelo Programa de Formação de Recursos Humanos (PRH 28.1) da ANP.

1 OBJETIVOS

1.1. Objetivo Geral

Estabelecer um arcabouço estratigráfico de detalhe para a seção devoniana da borda sudoeste da Bacia do Parnaíba, destacando as superfícies de inundação marinha. Estas serão delimitadas em termos de suas características geoquímicas e estratigráficas, visando avaliar os possíveis horizontes geradores de hidrocarbonetos, a partir da correlação dos dados obtidos nessas análises e, também, com os dados de poços localizados em regiões próximas à área de estudo.

1.2. Objetivos Específicos

Detalhar o arcabouço estratigráfico das sequências deposicionais devonianas tomando como base o estudo faciológico detalhado de dois poços continuamente testemunhados (GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO), perfurados no Município de Rio Sono, Estado de Tocantins, Brasil.

Caracterizar litofácies, associações de fácies e hierarquizar as superfícies limitantes.

Adquirir dados geoquímicos (carbono orgânico total, enxofre total, resíduo insolúvel e pirólise Rock - Eval) em intervalos selecionados, tendo em vista a avaliação do potencial gerador da região de estudo.

Correlacionar os objetos de estudo com poços próximos a fim de se estabelecer a correlação estratigráfica entre a seção aflorante em direção ao interior da Bacia.

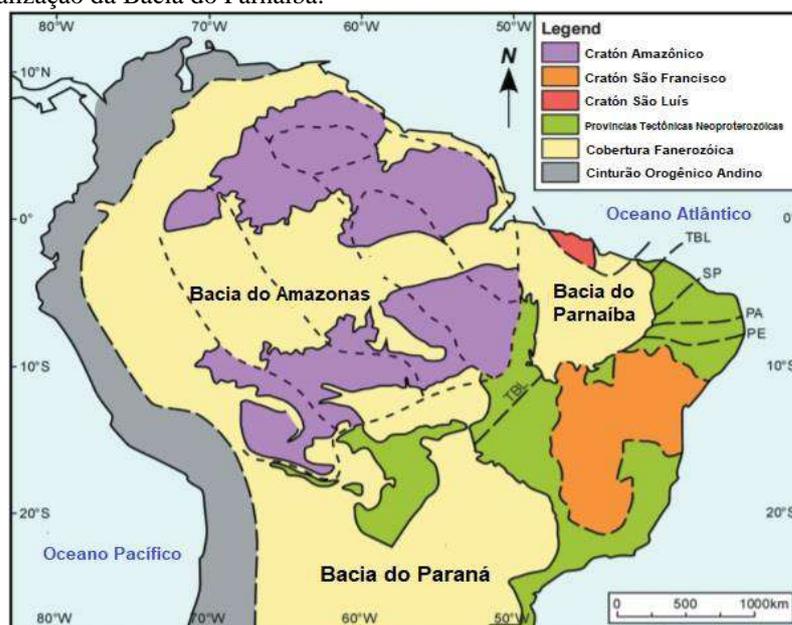
2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA BACIA DO PARNAÍBA

2.1 Localização

A Bacia do Parnaíba está localizada na porção ocidental da região nordeste do Brasil, abrangendo a quase totalidade dos estados do Piauí, Maranhão, Pará, Tocantins, Bahia e Ceará (Figura 1). Além disso, possui cerca de 600 mil km² atingindo, aproximadamente, 3.500m de espessura no depocentro (Vaz et al., 2007) e forma poligonal com direção Nordeste – Sudoeste (NE-SW) (Góes et al., 1995).

De acordo com Cunha (1986), a Bacia encontra-se posicionada entre faixas de dobramentos que bordejam os crátons do Amazonas, São Luís e São Francisco, bem como, os limites geológicos da Bacia são constituídos: a Norte, pelo Arco de Ferrer–Urbano Santos; a Noroeste, pelo Arco de Tocantins e; a Sul e Sudeste por coberturas de idade pré-cambriana, correlatas à faixa de dobramento Brasília, designadas por “Bacia de São Francisco” e “Bacia dos Lençóis”. Adicionalmente, Góes (1995) discute outros limites, os quais são definidos: a leste pela Falha de Tauá; a sudeste pelo Lineamento Senador Pompeu; e a oeste pelo Lineamento Tocantins–Araguaia.

Figura 1 - Localização da Bacia do Parnaíba.

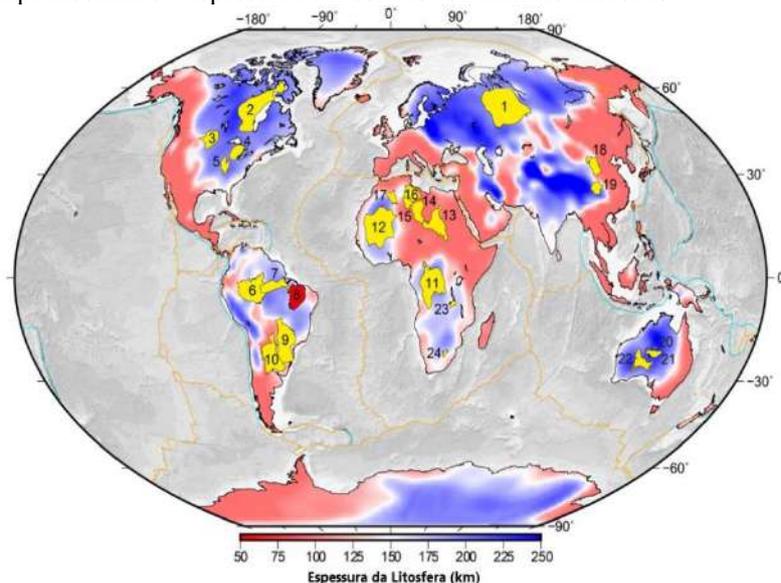


Fonte: Modificado de Castro et al., 2014.

2.2 Evolução Tectono-Sedimentar

A Bacia do Parnaíba é classificada como Bacia cratônica, devido a sua localização, além disso, possui pequena espessura da litosfera (**Figura 2**). Segundo Szatmari & Porto (1982), particularidades sedimentares da Bacia sugerem uma subsidência flexural térmica lenta durante sua evolução no Paleozoico. Tal Bacia foi amalgamada e teve sua estabilização ao final da Orogenia Pan-Africana (Neoproterozoico – 720-540 Ma) (Cordani et al. 2009; Castro et al. 2014, 2016). Cunha (1986) e Góes et al. (1994) associam o desenvolvimento tectono-sedimentar da Bacia aos pulsos terminais e eventos térmicos do Ciclo Brasileiro (c.a. 500Ma), sendo estes percursos da formação de grabens distribuídos ao longo da presente Bacia, com orientação nordeste a norte em seus eixos. Dois grandes eventos ígneos ocorreram durante o desenvolvimento da Bacia: extensivo magmatismo no Eojurássico (associado à anomalia térmica responsável pela abertura do Oceano Atlântico – CAMP (Província Magmática do Atlântico Central); e diques e soleiras de idade do Eocretáceo, que correspondem à quebra do Supercontinente Gondwana entre as placas Africana e Sul-Americana. Estudos evidenciaram que a oeste, a Formação Mosquito está exposta, enquanto que na seção oriental, a Formação Sardinha aflora com maior expressividade (**Figura 3**) (Fodor et al., 1990).

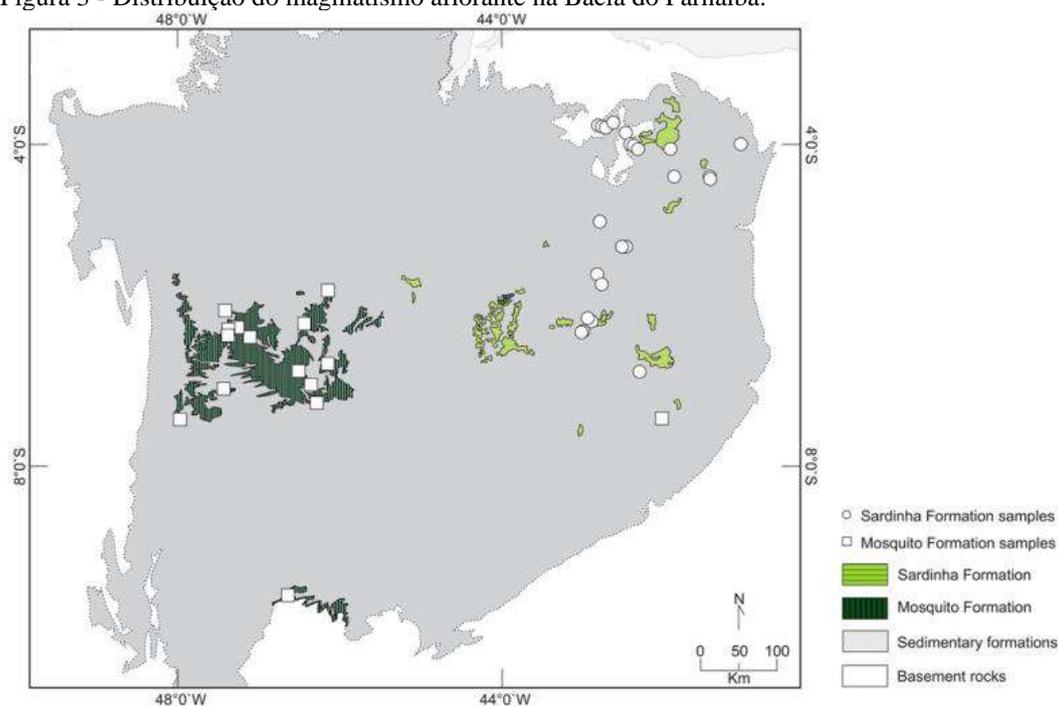
Figura 2 - Mapa mostrando a espessura de litosferas continentais terrestres



Legenda: as 24 Bacias cratônicas do mundo (em amarelo), a Bacia do Parnaíba (em vermelho) que apresenta baixos valores de espessamento, cerca de 50 – 75 km.

Fonte: Adaptado de Daily et al., 2018.

Figura 3 - Distribuição do magmatismo aflorante na Bacia do Parnaíba.



Fonte: Oliveira et al., 2018.

2.3 Estruturação da Bacia

De acordo com Vaz et al. (2007), existem três estruturas morfo-estruturais maiores, quais sejam: Lineamentos Picos-Santa Inês e Marajó Parnaíba, além do Lineamento Transbrasiliano que atravessa a Bacia na porção nordeste e sul-sudeste.

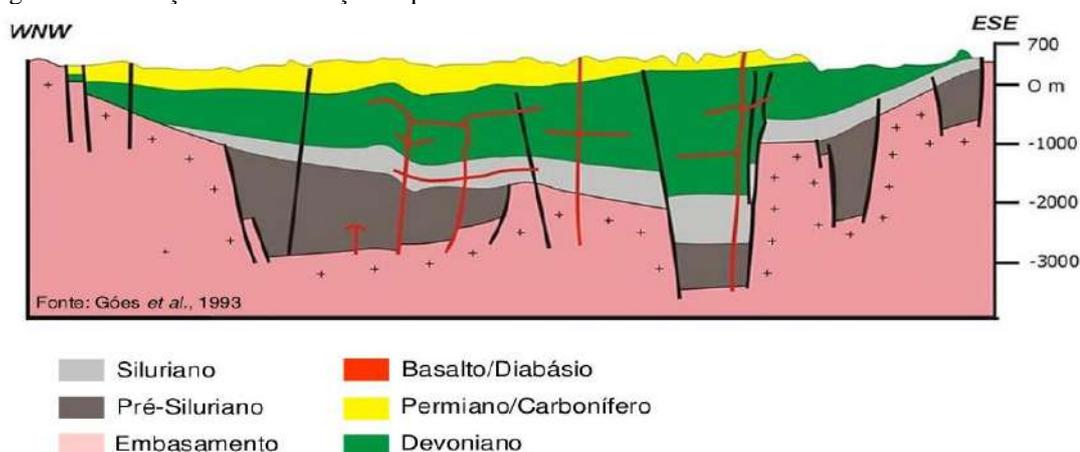
O Arco Ferrer-Urbano Santos, uma feição flexural positiva mesozoica, relacionada com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial, está localizada no limite norte da Bacia do Parnaíba, onde o rifteamento Atlântico quebrou a continuidade então existente com as bacias análogas que, atualmente, estão assentadas no noroeste da África (Milani e Thomaz Filho, 2000).

Mocitaiba et al. (2017) mencionam outros importantes elementos estruturais que compartimentam a Bacia, a saber: Estrutura de Xambioá, o Arqueamento do Alto Parnaíba e o Sistema de Lineamentos orientados segundo a direção Noroeste – Sudeste (NW-SE) (Zona de Cisalhamento Tentugal). Os dois primeiros apresentam orientação principal Leste – Oeste (E-W), e pode ter tido continuidade nos lineamentos da Província Borborema. O Lineamento Transbrasiliano apresenta direção preferencial N30°E e é composto por um sistema de zonas

de cisalhamento dúctil, formando conjuntos paralelos de falhas que atravessam a Bacia do Parnaíba longitudinalmente com direção NNE-SSW (Brito Neves & Fuck, 2014; Castro et al., 2014).

Ademais, concomitantemente aos processos de subsidência, ocorreram soerguimento e arqueamento posteriores que, segundo Góes e Feijó (1994), ocasionaram falhamentos intrabaciais do Siluriano ao Jurássico na extensa sinéclise do Parnaíba. Além disso, Vaz et al. (2007) relatam a existência de blocos falhados com pequenos rejeitos, assim como, dobras e outras estruturas resultantes da intrusão de corpos ígneos no Cretáceo (**Figura 4**).

Figura 4 - Ilustração da estruturação esquemática da Bacia do Parnaíba



Fonte: Goes et al., 1993.

2.4 Estratigrafia

De acordo com Vaz et al. (2007), o registro sedimentar da Bacia compreende rochas siliciclásticas, calcários, anidritas, sílex, além de diques de diabásio cretáceos e basaltos provenientes do Jurássico Inferior.

Vaz et al. (2007) discutem as superseqüências nas quais o arcabouço estratigráfico da Bacia do Parnaíba é dividido, quais sejam: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera - Eotriássica, Jurássica e Cretácea (**Figura 5**). As superseqüências mencionadas acima são delimitadas por discordâncias que se alongam por toda a Bacia, ou então, em regiões extensas.

Dentro da história geológica da Plataforma Sul-Americana, as sequências Siluriana (Formações Ipu, Tianguá e Jaicós), Mesodevoniana-Eocarbonífera (Formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti) e Neocarbonífera-Eotriássica (Formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba), encontram-se no estágio de estabilização e suas discordâncias estão relacionadas à gênese, sendo em parte relacionadas às flutuações dos elevados níveis eustáticos dos mares epicontinentais no Eopaleozoico. Enquanto que as transgressões do oceano, adjacente à margem ativa do sudoeste do Gondwana e de bacias do norte atual da África, teriam sido inundadas pelo Oceano Tethys. A borda ativa do Gondwana, adjacente à plataforma, ocasionou orogêneses que teriam culminado em ascensões epirogenéticas. Tal fato teria tido papel importante nas regressões e nas discordâncias erosivas (Vaz et al., 2007).

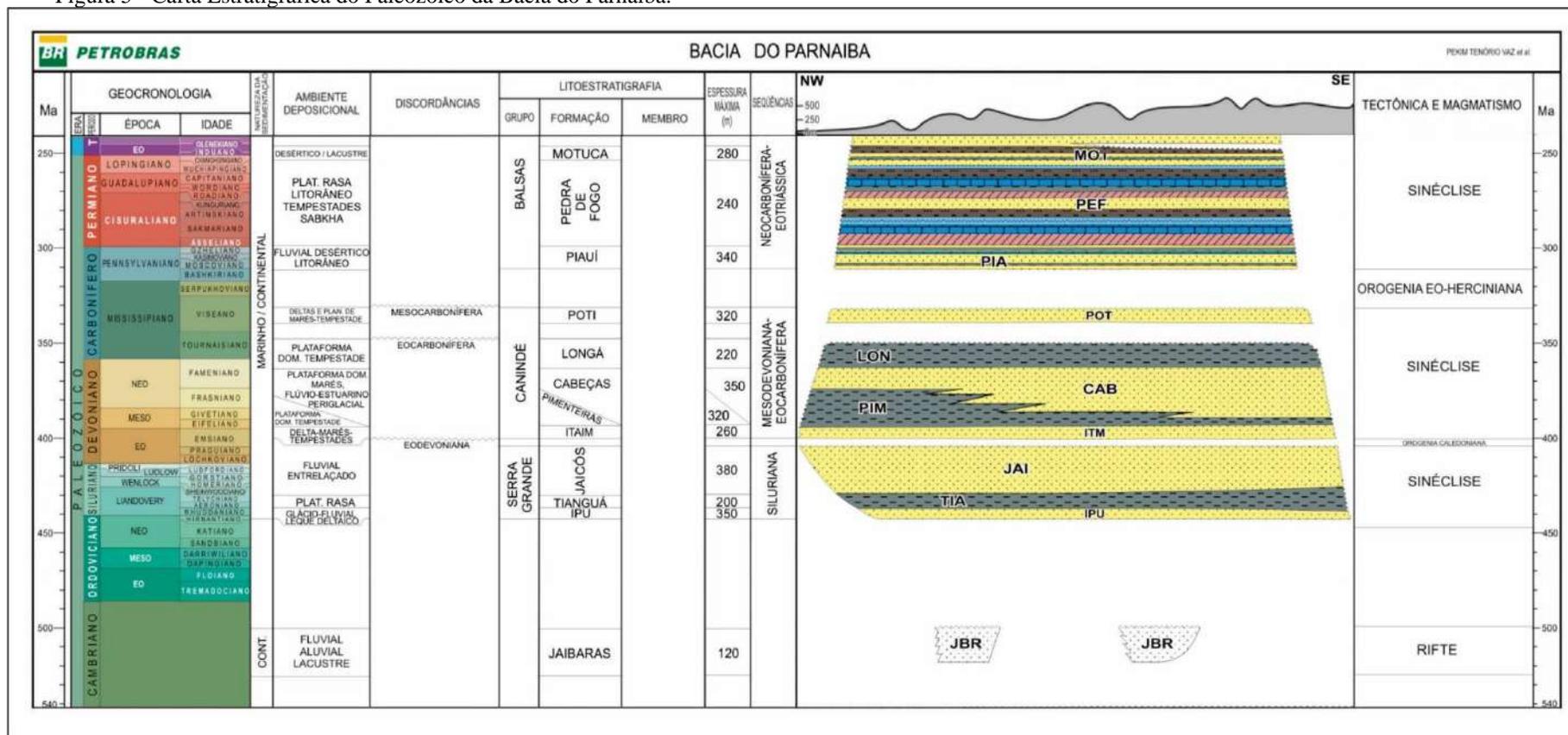
A deposição das rochas básicas da Formação Mosquito e a carga sedimentar pré-existente teriam provocado subsidência que culminou com a deposição da sequência Jurássica (Formação Pastos Bons). O final dessa fase sedimentar teria sido uma consequência das atividades tectônicas ocorridas durante a abertura do Atlântico Equatorial (Vaz et al., 2007).

Por fim, a sequência Cretácea (Formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru) é caracterizada pelo deslocamento do depocentro da Bacia da região central para as proximidades da borda norte e noroeste, como reflexo da abertura do Atlântico. Nesta supersequência é possível observar sedimentos provenientes de regimes transgressivos e regressivos do referido oceano em seu estágio inicial de desenvolvimento (Vaz et al., 2007).

Della Fávera (1990) considera que a eustasia é o fator principal no controle dos ciclos transgressivos-regressivos da sedimentação e, conseqüentemente, das discordâncias encontradas nos limites das supersequências da Bacia do Parnaíba.

As supersequências serão discutidas abaixo baseada no trabalho de Vaz et. al. (2007), a saber:

Figura 5 - Carta Estratigráfica do Paleozoico da Bacia do Parnaíba.



Fonte: Modificado de VAZ et al., 2007.

2.4.1 Sequência Siluriana

A sequência siluriana correspondente ao Grupo Serra Grande, representa um ciclo transgressivo - regressivo completo, o qual está assentado sobre rochas proterozoicas ou sobre depósitos cambrianos (ordovicianos?) aflora, majoritariamente, na extremidade da porção leste da Bacia onde é bordejada por rochas do embasamento. A Formação Ipu é a unidade mais antiga, depositada em diversos ambientes (como: glacial proximal e glacio-fluvial, a leques ou frentes deltaicas) e caracterizada por arenitos com seixos, conglomerados com matriz areno-argilosa e matações de quartzo ou quartzito e arenitos finos a grossos (Vaz et al., 2007).

A Formação Tianguá, sobreposta e concordante à Formação Ipu, representa uma Superfície de Inundação Máxima (SIM) depositada em ambiente de plataforma rasa, sendo composta de folhelhos cinza-escuros, bioturbados, sideríticos e carbonáticos, de arenitos cinza-claros, finos a médios, feldspáticos e de intercalações de siltitos e folhelhos cinza-escuros, bioturbados e micáceos. A Formação Jaicós, localizada ao topo, também possui contato concordante à camada sobrejacente, e é constituída por arenitos cinza com tonalidades claras, creme ou amarronzada, grossos, contendo seixos angulares a subangulares, mal selecionados, friáveis, maciços ou com estratificação cruzada, ou então, lenticular (Caputo, 1984; Góes & Feijó, 1994).

2.4.2 Sequência Mesodevoniana Eocarbonífera

Os estratos da sequência mesodevoniana-eocarbonífera foram depositados discordantemente sobre a sequência mais antiga, aflorando nas regiões leste e sudoeste da Bacia. Adicionalmente, é composta pelo Grupo Canindé que está subdividido em quatro formações, a saber (Vaz et al., 2007):

- a) Formação Itaim: composta por arenitos finos a médios subarredondados, bem selecionados e com alta esfericidade, com a presença de intercalações de folhelhos bioturbados na base. Esses sedimentos foram depositados em ambientes deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestades;
- b) Formação Pimenteiras: constituída por folhelhos cinza-escuros a pretos, esverdeados, em parte bioturbados, ocasionalmente radioativos e ricos em

matéria orgânica, e que representam intervalos potencialmente geradores associados a fases de inundações marinhas. Devido a sedimentação ter acontecido em um ambiente de plataforma rasa dominada por tempestades, se observa a intercalação de siltitos e arenitos, estes exibindo, frequentemente, laminação cruzada por onda ou estratificação cruzada *hummocky*;

c) Formação Cabeças: composta, majoritariamente, por arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações de siltitos e folhelhos. Subordinadamente, ocorrem diamictitos na parte superior. Tilitos, pavimentos e seixos estriados denotam um ambiente glacial ou periglacial (Caputo, 1984). Estruturas como estratificação cruzada tabular ou sigmoidal predominam, e tempestitos ocorrem localizados na transição para a Formação Pimenteiras (Della Fávera, 1990). Além disso, Fácies flúvio-estuarinas também ocorrem. Góes e Feijó (1994) defendem um ambiente plataformal sob a influência preponderante de correntes desencadeadas por processos de marés. Ponciano e Della Favera (2009) propõem a deposição a partir de sistemas flúvio-deltaicos dominados por inundações;

d) Formação Longá: caracterizada por folhelhos cinza-escuros, homogêneos e bioturbados. Em geral, apresenta pacote de arenitos e siltitos na porção média, sendo representativo de um ambiente plataformal dominado por tempestades (Góes & Feijó, 1994);

e) Formação Poti: composta por uma sucessão de estratos divididos em duas porções, quais sejam: inferior, constituída de arenitos cinza esbranquiçados, médios, com lâminas dispersas de siltitos cinza-claros; e a superior de arenitos cinza, lâminas de siltitos e folhelhos com eventuais níveis de carvão. A deposição dessa unidade ocorreu em deltas e planícies de maré, ocasionalmente influenciada por tempestades (Góes e Feijó, 1994). Ressalta-se seu contato superior com a Formação Piauí que é discordante, erosiva.

2.4.3 Sequência Neocarbonífera – Eotriássica

A sequência neocarbonífera-eotriássica é observada, em superfície, principalmente, nas regiões centro-sul e, em parte das regiões oeste e leste-nordeste da Bacia. Tendo o Grupo Balsas como o pacote sedimentar representante. Em uma seção, aproximadamente, norte-sul, controlada por poços, se observa a coincidência entre os depocentros dessa unidade e os das duas sequências mais antigas da Bacia. Entretanto, numa seção oeste-leste, verificou-se que o depocentro da Sequência Neocarbonífera - Eotriássica está situado a oeste. Tal sequência é subdividida em quatro formações (Vaz et al., 2007):

- a) Formação Piauí: composta por arenitos róseos, médios, maciços ou com estratificação cruzada de grande porte, além da presença de intercalações de folhelho vermelho na parte inferior. Contudo, a superior é formada de arenitos vermelhos, amarelos, finos a médios, com intercalações de folhelhos vermelhos, calcários e finas camadas de sílex. Segundo Caputo (1984), podem ocorrer siltitos e lentes conglomeráticas. Melo et al. (1998) denotam que essa unidade é pensilvaniana. De acordo com Lima e Leite (1978), o ambiente característico é interpretado como fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, inseridos em um clima semi-árido a desértico;
- b) Formação Pedra de Fogo: caracterizada por uma ampla variedade de rochas, quais sejam: sílex; calcário oolítico e pisolítico bege a branco, sendo ocasionalmente, estromatolítico, intercalado com arenito fino a médio amarelado; folhelho cinzento; siltito; anidrita; e, eventualmente, dolomita. Góes e Feijo (1994) relatam que esses sedimentos foram depositados em um ambiente marinho raso a litorâneo com planícies de sabkha, sob ocasional influência de tempestades. Dino et al. (2002) concluem que tal unidade é permiana. Já os contatos são concordantes com as Formações Piauí (subjacente) e Motuca (sobrejacente);
- c) Formação Motuca: constituída por, majoritariamente, siltito vermelho/marrom e arenito branco fino a médio, e subordinadamente, folhelho e lentes delgadas de anidrita e calcários (Lima e Leite, 1978). Góes e Feijó (1994) discorrem sobre os sedimentos dessa Formação serem depositados em um sistema desértico, com lagos associados. Caputo (1984) considera que a idade associada se estende do Permiano terminal ao início do

Eotriássico. O contato com a Formação Pedra de Fogo (subjacente) é concordante;

d) Formação Sambaíba: composta por arenitos vermelhos a cor-de-rosa, creme-claro/esbranquiçado, em geral, finos a médios, subangulosos a subarredondados. As dunas com estratificação cruzada de grande porte, contendo diversas feições típicas de sedimentos eólicos caracterizam rochas de um sistema desértico, com contribuição fluvial. Lima e Leite (1978) comentam que em algumas áreas, na porção superior se notam disjunções colunares prismáticas, devido à influência térmica do capeamento basáltico.

2.4.4 Sequência Jurássica

A sequência jurássica é constituída pela Formação Pastos Bons, a qual está sobreposta às rochas basálticas da Formação Mosquito. Os litotipos dessa Formação estão subdivididos em três partes: na base, arenito branco ou com tonalidades esverdeadas/amareladas, fino a médio, subarredondados e, comumente, apresentam estratificação paralela com raras lentes de calcário; no meio, siltito e folhelho/argilito cinza a verdes, geralmente, intercalados com arenito; e no topo, arenito vermelho/cor-de-rosa, fino, gradando para siltito, e contendo níveis de folhelho (Caputo, 1984). De leste para oeste, a Formação Pastos Bons está assentada discordantemente sobre as Formações Paleozoicas Poti, Piauí, Pedra de Fogo e Motuca (Lima e Leite, 1978). Além disso, tal Formação foi depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, tendo alguma contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido. A idade atribuída à Formação supracitada é mesojurássica a neojurássica (Vaz et al., 2007).

2.4.5 Sequência Cretácea

No Cretáceo, houve deslocamento dos depocentros, da região central para as extremidades norte e noroeste da Bacia, em resposta a abertura Oceano Atlântico. Em superfície, a Sequência Cretácea ocorre, principalmente, na porção Noroeste - Norte da Bacia e está sobreposta discordantemente sobre as rochas das sequências Jurássica e das mais antigas. É constituída pelas seguintes Formações cuja relação é de contemporaneidade (Vaz et al., 2007), quais sejam:

- a) Formação Corda: composta por, essencialmente, arenitos vermelhos, castanho-avermelhados, muito finos/finos e médios, com seleção regular a boa, semifriáveis a semicoesos, ricos em óxidos de ferro e zeólitas. Quando sobrepostos a basaltos, é abundante a presença de fragmentos desses como arcabouço. As estruturas presentes são: estratificações cruzadas de grande porte, *climbing ripples* transladantes, fluxos de grãos, estratificações cruzadas de baixo ângulo e acanaladas. Dadas as estruturas listadas, se deduz que essa unidade foi depositada num sistema desértico;
- b) Formação Grajaú: representada por arenitos creme-claro/esbranquiçado, bege-amarelado ou variegados, médios a grossos, subangulosos a angulosos e mal selecionados. Sendo comum a presença de seixos e de níveis conglomeráticos. Subordinadamente, ocorrem camadas de arenitos finos a muito finos e de pelitos. Quanto às estruturas, ocorrem estratificações cruzadas acanaladas e marcas de carga;
- c) Formação Codó: composta por folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita, arenito, além de níveis de sílex e estromatólitos. As camadas de gipsita são recobertas, de modo abrupto, por folhelhos beges a cinzas/pretos esverdeados, inferindo uma ampla inundação (transgressão) ocorrida no mar/ lago Codó. Rossetti et al., 2001b (apud Vaz et. al., 2007) abordam sobre as Formações Grajaú e Codó, ambas depositadas no Neoptiano/ Eoalbiano, serem provenientes de ambientes marinho raso, lacustre e flúvio-deltaico;
- d) Formação Itapecuru: formada por arenitos e pelitos de idade Mesoalbiana – Neocretácea (Rossetti et al., 2001b apud Vaz et. al., 2007) de natureza transgressiva, e correspondem a seis ciclos deposicionais relacionados a sistemas de vales estuarinos incisos. Sendo o litotipo mais ocorrente formado por arenitos variegados, finos, friáveis, com estruturas diversas (como, por exemplo, estratificações cruzadas *swaley*,

hummocky, acanalada, tabular, *mud couplets* e escorregamento de massa). Pelitos e arenitos conglomeráticos também ocorrem, de maneira secundária, segundo Anaisse Junior et al. (2001 apud Vaz et. al., 2007). A Formação supracitada recobre discordantemente as Formações Grajaú e Codó (Rossetti et al., 2001a apud Vaz et. al., 2007).

2.5 Formação Pimenteiras

A Formação Pimenteiras é sobreposta pela Formação Cabeças e sotaposta à Formação Itaim. No que tange à litologia, é composta, principalmente, de folhelhos cinza a pretos, ocasionalmente esverdeados, em parte bioturbados; em alguns intervalos específicos são radioativos e ricos em matéria orgânica, intervalos estes associados à importantes inundações marinhas, segundo Rodrigues (1995). Verifica-se também a existência de intercalações de siltito e arenito, típicas de depósitos acumulados em um ambiente de plataforma rasa dominada por tempestades.

Inundações marinhas registradas no Devoniano iniciaram um ciclo transgressivo/regressivo de idades Eoefeliana e Eogivetiana, que compreende a Formação Itaim, a parte basal e média da Formação Pimenteiras e a parte inferior da Formação Cabeças. Nas porções superiores das duas últimas formações ocorre uma nova transgressão no Neofrasniano-Eofameniano. Durante essa idade, na Formação Pimenteiras, houve a SIM ocasionando registros de altos teores de carbono orgânico (Della Fávera, 1990).

Rodrigues (1995) ao estudar amostras de poços da Bacia do Parnaíba abordou sobre 3 tipos de folhelhos radioativos ricos em matéria orgânica encontrados na Formação Pimenteiras, quais sejam: Folhelho A (representante do limite Eifeliano/Givetiano), Folhelho B (corresponde ao Givetiano Médio) e Folhelho C (depositado no Frasniano). Tais folhelhos configuram episódios de superfícies de inundação marinha, sendo que o último intervalo relacionado a SIM ocorrida no Devoniano.

Outra conclusão verificada pelo mesmo autor é de que, considerando-se as condições de soterramento na bacia, a evolução térmica dos intervalos radioativos ricos em matéria orgânica alcançou apenas a fase inicial de geração de hidrocarbonetos nas partes mais profundas da bacia, especificamente, nos Folhelhos A (localizado na base da

Formação Pimenteiras), sendo, por si só, insuficientes para propiciar geração de hidrocarbonetos. Rodrigues (1995) indicou, então, de forma pioneira, que o efeito térmico das intrusivas foi decisivo para explicar satisfatoriamente os mecanismos de geração, migração e acumulação de hidrocarbonetos na Bacia. Contudo, desses Folhelhos listados, os Folhelhos B e C que teriam melhores propensões à acumulação, porém ao ser investigado o grau de maturação térmica desses, foi constatado que se trata de folhelhos imaturos termicamente (Rodrigues, 1995).

Quanto ao sistema deposicional, acredita-se que a os depósitos da Formação Pimenteiras tenham se acumulado em um sistema marinho raso plataformar sob ação de correntes de tempestade (Caputo, 1984; Della Fávera, 1990; Vaz et al., 2007).

2.6 Caracterização Geoquímica

Menezes et al. (2008) ressaltam que, para o sucesso de uma exploração petrolífera, se faz necessário a utilização de ferramentas geoquímicas e a interpretação dos resultados analíticos obtidos pela geoquímica orgânica em rochas geradoras de hidrocarbonetos.

Rodrigues (1995) identificou três intervalos potencialmente geradores dentro da Formação Pimenteiras, A, B e C, os quais possuem Carbono Orgânico Total (COT) variando em 1,0 – 3,0%, 1,0 – 3,5% e 1,0 – 5,0%, respectivamente. Zambrano et al. (2017) estudaram amostras de afloramento da formação, no Estado do Tocantins, no que concerne à geoquímica orgânica e constatou-se que nas localidades mais próximas a base da Formação os teores de COT permeiam abaixo de 1,0%, entretanto, nas zonas superiores os mesmos teores são, majoritariamente, maiores do que 1,0% o que possivelmente corresponde a uma superfície de máxima inundação. No geral, foi observado que as amostras com valores maiores de porcentagem de enxofre tendem a apresentar elevados teores de COT para os afloramentos analisados no estudo supracitado.

2.7 Estratigrafia de Sequências

O estudo da sismoestratigrafia surgiu na década de 1970 e possibilitou a correlação entre seções sísmicas para geração de imagens tridimensionais, como também, a identificação da geometria dos estratos e de discontinuidades físicas no registro sedimentar. Posteriormente, esse estudo derivou em outro ramo da geologia, a Estratigrafia de Sequências que, segundo Posamentier & Vail (1988), é o ramo da geologia onde se estuda estratos associados a um arcabouço de superfícies cronoestratigráficas significativas.

Della Fávera (2001) destaca que a unidade fundamental da Sismoestratigrafia e da Estratigrafia de Sequências é a sequência, que é constituída por um conjunto geneticamente relacionados de estratos, delimitado por discordâncias ou concordâncias relativas. Podendo ser subdividida em: tratos de sistema, definidos a partir da posição dentro da sequência; parassequências, unidades de menor ordem que seriam limitadas por superfícies de inundação marinha; e, conjuntos de parassequências. Outra observação feita pelo mencionado autor é que os limites da sequência e, como também, os da parassequência e do conjunto de parassequências permitem construir um arcabouço cronoestratigráfico que pode ser utilizado para correlação e mapeamento de rochas sedimentares. Adicionalmente, sequências e seus componentes associados são resultado da interação entre taxas de eustasia, subsidência e aporte sedimentar (Vail et al., 1977, apud Della Fávera, 2001).

O crescente número de pesquisas culminou na ampliação e refinamento dos conceitos precursores da Estratigrafia de Sequências, como os seguintes trabalhos: Vail et al. (1984), Vail (1987), Wilgus et al. (1988), Van Wagoner et al. (1990) e Catuneanu (2006).

Já no que tange à Bacia do Parnaíba, a análise estratigráfica foi elaborada por alguns pesquisadores, entre eles: Della Fávera (1990), Góes & Feijó (1994), Góes (1995), Albuquerque (2000), Young (2003, 2006), Vaz et al. (2007), Bianchini (2018) e Martins (2019).

Della Fávera (1990) utilizou a estratigrafia de sequências no estudo do poço 1-CA-1-MA combinado a dados do perfil de raio gama para propor a sequência devoniana de 2ª ordem na Bacia. Tal intervalo seria delimitado por discordância basal (contato entre Devoniano e o Siluriano), e o limite superior ser um nível de diamictito (marcador temporal do período glacial Fameniano), além disso, a SIM na base do Frasniano (Della Fávera, 2001).

Góes & Feijó (1994) sugerem que a Formação Pimenteiras pertence a uma sequência de segunda ordem (sequência Devoniana – Mississippiana), e no geral, compreendem que existam na Bacia, propriamente dita, 3 superseqüências, a saber: Siluriana (Grupo Serra Grande), Devoniana (Grupo Canindé) e Carbonífero-Triássica (Grupo Balsas).

Goes (1995) realizou análise faciológica de rochas siliciclásticas pertencentes as Formações Poti (Mesocarbonífero), Longá (Eocarbonífero) e Piauí (Neocarbonífero), a partir de dados de superfície e subsuperfície na borda leste e oeste da Bacia, reconhecendo duas seqüências deposicionais distintas, separadas por uma discordância, quais sejam: a primeira concerne depósitos do topo da Formação Longá e base da Formação Poti (Grupo Canindé), e a segunda, formada por depósitos basais da Formação Piauí (Grupo Balsas).

Albuquerque (2000) (apud Young, 2003) utilizou os conceitos adotados em Estratigrafia Genética de Galloway (Galloway, 1989) para subdividir a seqüência Devoniana em 9 seqüências de 3ª ordem, sendo a Formação Pimenteiras (objeto principal desse estudo) correlacionada com 5 seqüências, a saber: C, D, E, F e G (parte do topo dessa última é atribuído a Formação Cabeças).

Depósitos de regressão forçada, característicos de uma queda relativa do nível do mar, foram identificados, pela primeira vez, na Formação Pimenteiras por Young (2003). O mesmo autor em 2006 realizou uma estratigrafia de alta resolução na mencionada Formação e, também, em seus limites sotoposto e sobreposto, Itaim e Cabeças, respectivamente. Nesse último estudo, a partir de testemunho de sondagem e perfil geofísico, foi possível a identificação de nove seqüências (de quarta ou quinta ordem), quinze fácies sedimentares, sete sucessões de fácies e vinte superfícies estratigráficas.

Vaz et al. (2007) dividiram o arcabouço estratigráfico da Bacia em 5 superseqüências, como já discriminadas acima no tópico 2.4, além de adicionar a discordância Eocarbonífera entre as Formações Longá e Poti.

Bianchini (2018) estudou seções sedimentares da Bacia do Parnaíba do intervalo Eossiluriano (base) ao Eocarbonífero (topo da Formação Poti), por meio de análise de Sequências Depositionais T-R (“Eletroseqüências”) onde foram individualizadas 5 seqüências, quais sejam: Eossiluriana (E-SEQ-1); Siluriana (E-SEQ-2); Siluriana-Devoniana (E-SEQ-3); Sequência Devoniana (E-SEQ-4); e Sequência Devoniana-Mesocarbonífera (E-SEQ-5). Com esse trabalho, a Autora pôde descrever um modelo de evolução estratigráfica para a Bacia contendo algumas diferenças em relação aos modelos

antecessores apresentados por Góes e Feijó (1994) e Vaz et al. (2007). Tais distinções se referem a constatação nos perfis de ciclos transgressivos-regressivos na porção superior da seção.

Martins (2019) estudou cerca de 40 poços (profundos e rasos) perfurados na Bacia e, por meio de, análise estratigráfica detalhada do intervalo pertencente às Formações Pimenteiras e Cabeças, identificou 4 superfícies de inundação marinha (A, B, C, e D), que teriam como idades do Eifeliano ao Neofameniano. Segundo a Autora, tais superfícies limitam três sequências genéticas de 3ª ordem, quais sejam: AB, BC e CD. Adicionalmente, foram identificadas outras 7 superfícies de maior resolução, que quando associadas às superfícies principais, delimitam, ao todo, 11 ciclos de 4ª ordem, além do rastreamento de ciclos de 5ª ordem dentro da sequência AB na borda leste.

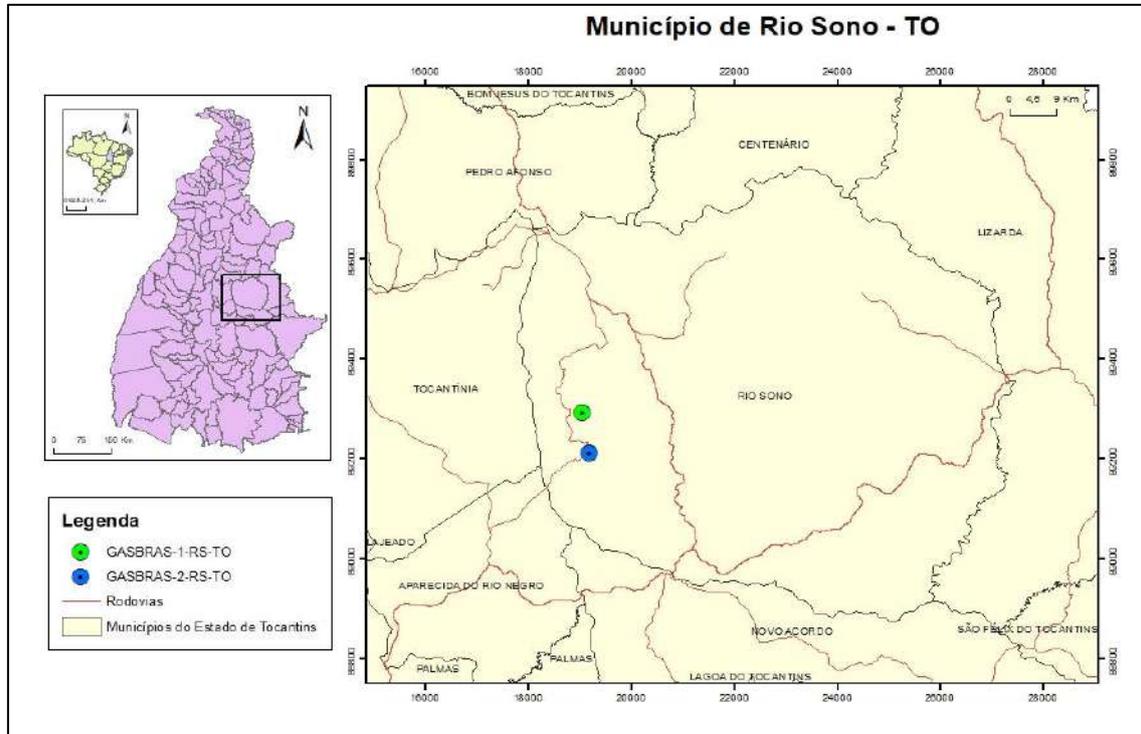
3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização de Poços

Este trabalho baseia-se no estudo de dois poços GASBRAS-1-RS-TO (Poço 1 - **Apêndice A, B, C, D e E**) e GASBRAS-2-RS-TO (Poço 2 - **Apêndice F, G, H, I e J**), continuamente testemunhados, que estão localizados geograficamente no Município de Rio Sono, Estado de Tocantins, Brasil, com as coordenadas em UTM, a saber: 190614m E, 8929341m S - Zona 23L; e 191967 m E, 8921176 m S - Zona 23L, respectivamente (**Figura 6**). Os referidos poços situam-se na borda oeste da Bacia do Parnaíba.

Foram coletadas, ao total, 353 amostras, sendo 54 do poço 1 e 299 do poço 2, para análise geoquímica. Além disso, esses dois poços foram descritos no que tange às suas características sedimentológicas e estratigráficas cujas extensões são, respectivamente: 280,30 m e 319,10 m.

Figura 6 - Mapa de Localização dos Poços 1 (verde) e 2 (azul) no Município de Rio Sono, Tocantins, Brasil.



Fonte: Autora, 2021.

Adicionalmente, dados de perfis geofísicos – em particular, dados das curvas de raios gama – de dois poços exploratórios perfurados na poção sudoeste da Bacia do Parnaíba foram utilizados para o rastreamento dos intervalos associados às superfícies de inundação máxima identificadas no âmbito da Formação Pimenteiras. Esses poços exploratórios são: 1-TM-1-MA, cujas coordenadas UTM são 90368540 e 2902199, Datum SAD 69; e 1-FO-1-MA, cujas coordenadas UTM são 90867680 e 3638535, Datum SAD 69, situados, respectivamente, cerca de 152,0 km e 241,0 km a nordeste do poço GASBBRAS-2-RS-TO. Os dados desses poços foram obtidos a partir da plataforma de acesso gratuito aos dados públicos de bacias terrestres brasileiras, sendo disponibilizado pelo Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), e acessível ao público em <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE> (acesso em agosto de 2021).

3.2 Análise de Fácies Sedimentares e Análise Estratigráfica

A análise de fácies foi baseada nos conceitos de Walker (1992). Neste sentido, a fácies constitui uma unidade de rocha que pode ser caracterizada e distinguida através de seus atributos principais, tais como litologia, cor, estrutura sedimentar, geometria, fósseis, etc. A cada fácies é atribuída uma interpretação em termos de processos sedimentares geradores. O contexto das fácies, que envolve a identificação de sucessões e associações de fácies, define a dinâmica deposicional em termos de sistemas deposicionais. Posteriormente, com base nas tendências dos empilhamentos estratigráficos observados nos testemunhos de sondagem e nos perfis de poços (associados aos dados geoquímicos), em termos de tendências retrogradacionais, progradacionais e agradacionais, são reconhecidas as superfícies-chaves da análise estratigráfica moderna (superfícies de discordância-SD, superfícies transgressivas-ST, superfícies de inundação máxima-SIM) e são definidos, assim, ciclos deposicionais de diferentes magnitudes/frequências (sequências) e seus tratamentos de sistemas deposicionais constituintes, de acordo com os preceitos apresentados, por exemplo, em Catuneanu (2006).

Uma sequência deposicional constitui, segundo Vail et al. (1977), “uma unidade estratigráfica composta de uma sucessão relativamente concordante de estratos

geneticamente relacionados e limitada, no topo e na base, por discordâncias ou suas conformidades correlatas”. Já as sequências de Galloway correspondem a ciclos deposicionais delimitados com base em superfícies de inundação marinha. Sequências T-R (Transgressivo-Regressivas) (*sensu* Embry & Johannessen, 1992) são também identificadas no registro sedimentar.

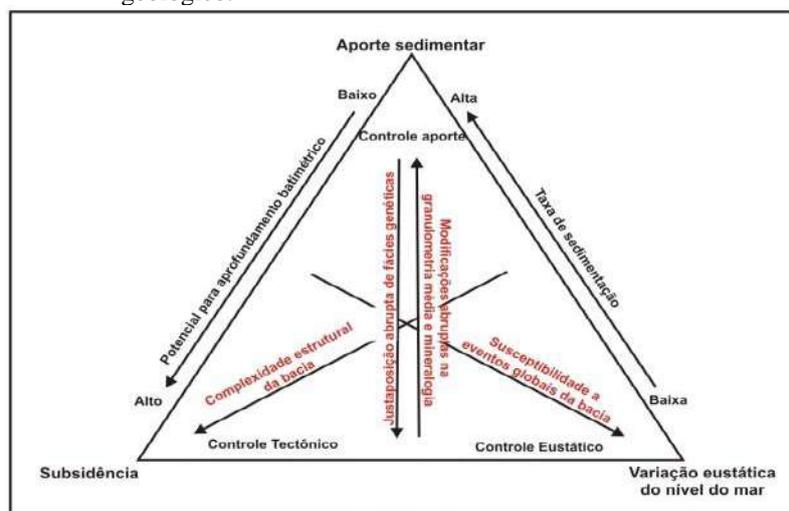
Durante o tempo geológico, essas sequências podem ser afetadas, sobretudo, pela variação do nível do mar, como também, pela tectônica, pela eustasia e, pelo aporte sedimentar. A atuação desses fatores listados pode gerar vestígios no registro sedimentar, que dependendo do condicionante pode apresentar ordens de hierarquia e magnitude distintas, construindo assim, ciclos (Vail et al., 1977, Galloway, 1989) (**Figura 7**).

Dessa forma, uma sequência deposicional pode ser dividida por suas características faciológicas e de acordo com as variações relativas do nível do mar, em tratos de sistemas.

A análise de fácies sedimentares é tida como a etapa principal neste trabalho, onde o objetivo se concentra em interpretar com maior nível de detalhe os poços estudados, a fim de serem estabelecidos com acurácia os limites das sequências sedimentares envolvidas. Além disso, verifica-se a existência de estruturas, tipologia de rochas, bem como, a descrição de litofácies deposicionais.

A evolução estratigráfica da Bacia pode ser evidenciada pela evolução estratigráfica expostas nas variações deposicionais presentes nos testemunhos, e também, na curva obtida pelos dados de Carbono Orgânico Total (COT).

Figura 7 - Diagrama ternário o qual sugere a interação entre os três fatores complexos principais (eustasia, tectônica e aporte sedimentar) na construção das sequências deposicionais durante o tempo geológico.



Fonte: Galloway, 1989.

Posamentier & Allen (1988 apud Della Fávera, 2001) dividem as sequências deposicionais em três tratos de sistema:

- a) Trato de Sistemas de Mar Baixo (TSMB): pode ser compreendido como uma associação de sistemas deposicionais contemporâneos desenvolvidos em resposta a uma queda relativa do nível do mar, na qual pode ocorrer erosão e deposição de fácies fluviais dentro da bacia, conseqüentemente, ocorre o aumento de aporte de areias e a atividade biológica devido a maior oxigenação do ambiente;
- b) Trato de Sistemas Transgressivo (TST): é implantado na fase em que os eventos de subida relativa do nível do mar acontecem, como consequência, há um avanço da linha de costa em direção ao continente. Desta forma, se estabelece o afogamento gradual dos sistemas deposicionais do trato ocorrentes no trato anterior até que, então, seja atingido o máximo do nível da SIM. Neste ambiente, em geral, são depositados sedimentos finos e há baixa oxigenação;
- c) Trato de Sistemas de Mar Alto (TSMA): atualmente, é designado como Trato de Sistemas Regressivo (TSR), *sensu* Catunenu (2006): Durante a fase regressiva, a taxa de aporte sedimentar supera a taxa de geração de espaço para acomodação, provocando assim, o registro de progradativo de fácies progressivamente mais proximais em direção ao topo.

A caracterização das sequências deposicionais, geralmente, é realizada por meio da interpretação de superfícies de inundação máxima e de discordâncias por padrões distintos em perfis de diferentes métodos utilizados associados à caracterização de fácies e estruturas sedimentares descritas.

3.3 Análise de Carbono Orgânico Total (COT), Enxofre Total (S) e Resíduo Insolúvel (RI)

A abundância de matéria orgânica nos sedimentos é usualmente expressa por meio do percentual relativo de Carbono Orgânico Total (COT%) em uma base de peso seco (Tyson, 1995; Mendonça-Filho et al., 2012). Com isso, também é possível obter o teor de Enxofre Total (S%) e o Resíduo Insolúvel (RI%).

O teor de Enxofre Total (%S) na amostra é usualmente correlacionado aos níveis redutores que, possivelmente, pode ser atribuído ao ambiente de sedimentação local.

Tyson (1995) aborda que os teores desses elementos não são constantes e dependem diretamente de alguns parâmetros, a saber: fonte, estado de preservação, tempo (idade) e estado de maturação da matéria orgânica.

As análises (COT e S) foram realizadas no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (LGQM) da Faculdade de Geologia da UERJ, através do analisador LECO SC 632. Os métodos adotados são aqueles descritos no ASTM D 4239 (*American Society for Testing and Materials - ASTM, 2008*) e NCEA-C-1282 (*United States Environmental Protection Agency - US EPA, 2002*).

O procedimento inicia-se com a pesagem de 0,25g da amostra *in natura*, previamente pulverizada, num recipiente de porcelana filtrante (cuja massa é conhecida). Após a pesagem, as amostras são acidificadas com HCl 1:1 a frio, e permanecem assim por 24 horas, para eliminação de todo carbonato. Em seguida se inicia a lavagem do material com água destilada quente a fim de promover a eliminação dos cloretos. A amostra deve permanecer por uma hora nesta etapa, e logo após segue-se a lavagem com água destilada em temperatura ambiente até que o pH fique próximo de 6 (seis). Nessa etapa também se escoar o excesso de água.

As amostras permanecem em banho de luz a 65°C, por aproximadamente 3 horas. Após ocorrer o resfriamento, os recipientes são pesados novamente e os valores encontrados são anotados.

Para realizar a combustão (queima), utiliza-se a massa inicial, ou seja, antes da acidificação. O valor da massa inicial deve ser inserido no programa do equipamento.

O resíduo insolúvel (RI) corresponde à fração de amostra não eliminada pelo tratamento ácido, pressupondo-se que houve a eliminação total dos carbonatos existentes, permanecendo assim, apenas o Carbono Orgânico no restante da amostra. O valor do RI é calculado com a seguinte equação:

$$RI (\%) = \frac{\text{Peso do insolúvel} \times 100}{\text{Peso inicial da amostra}} \quad (1)$$

3.4 Pirólise Rock-Eval

Segundo Espitalie et al. (1977), a pirólise pode ser conceituada como um processo no qual os materiais sólidos, líquidos e gasosos são degradados na ausência de oxigênio. Isso acontece porque nesse método, é simulado, em condições de laboratório, o processo natural de aquecimento da matéria orgânica, metagênese e catagênese, para a geração de hidrocarbonetos.

A análise também foi feita no LGQM da UERJ, onde se pesou cerca de 10 a 100 mg de amostra pulverizada e peneirada (80 mesh) em um cadinho de aço. Os cadinhos foram colocados no equipamento de pirólise *Rock Eval 6*, da marca Vinci, onde cada amostra foi aquecida em atmosfera inerte de 300 a 650°C.

Os resultados dessa etapa quando combinados aos dados de COT permitem a avaliação e identificação de rochas geradoras, bem como, a caracterização do tipo de querogênio existente no objeto de estudo.

A matéria orgânica é composta por duas frações, a saber: betume (solúvel em solventes orgânicos) e querogênio (insolúvel em solventes orgânicos).

Nessa técnica são obtidos três picos que correspondem, respectivamente, a S1, S2 e S3, além do valor proporcional a Temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$).

S1 equivale à quantidade, em mgHC/ gRocha, de hidrocarbonetos livres presentes na amostra (betume), e que podem ser extraídos normalmente por não terem sofrido anteriormente migração. Já o pico S2 corresponde a quantidade, em mgHC/ gRocha, de hidrocarbonetos liberados durante o aquecimento e craqueamento térmico do querogênio dentro do equipamento, sendo assim, se tem esse denominador como potencial gerador e que corresponderia aos hidrocarbonetos que a rocha analisada teria condições de gerar se fosse submetida às condições de soterramento adequadas. Enquanto que o pico S3 representa a quantidade, em mgCO₂/ gRocha, de dióxido de carbono (CO₂) liberado durante o craqueamento térmico do querogênio (Espitalié et al., 1985).

Espitalié et al. (1985) também abordam sobre a $T_{m\acute{a}x}$ significar a temperatura, em °C, em que ocorre a máxima liberação de hidrocarbonetos durante o craqueamento do querogênio. Se pode assim, correlacionar esse momento com o topo do pico S2 e

relacionar com um estágio importante de evolução térmica da matéria orgânica (Tabela 1).

Tabela 1 - Relação entre T_{máx} e estágio de maturação térmica.

T _{máx}	Evolução Térmica
< 440°C	Imaturo
440°C – 470°C	Maturo
> 470°C	Senil

Fonte: Espitalié et al.,1985.

Com os dados de S2 e S3 associados aos dados de COT, é possível calcular o Índice de Hidrogênio (IH – 1) , em mg de hidrocarbonetos/g de COT, e o Índice de Oxigênio (IO – 2), em mg de CO₂/g de COT, a partir dos seguintes cálculos:

$$\mathbf{IH} = S2/COT \times 100 \quad (2)$$

$$\mathbf{IO} = S3/COT \times 100 \quad (3)$$

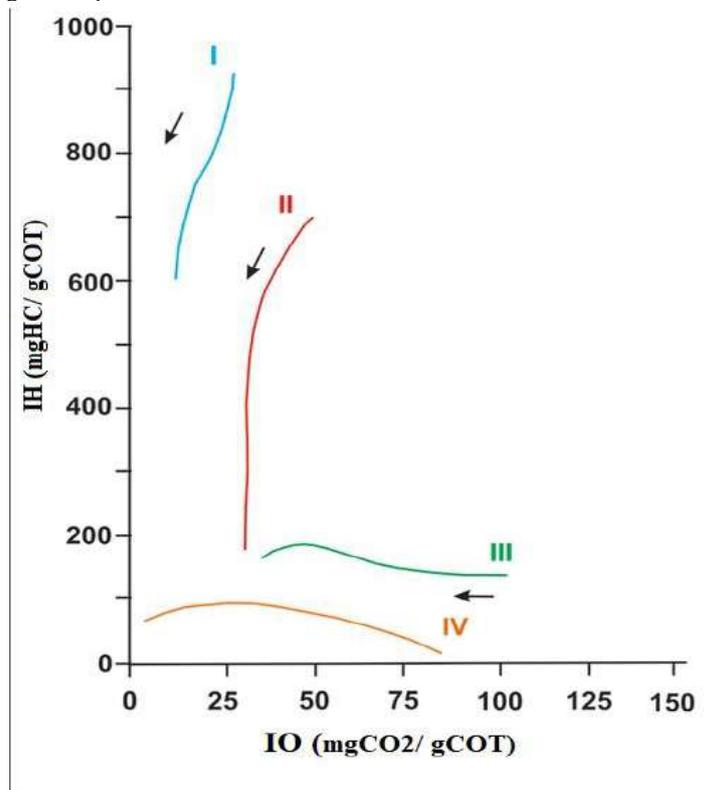
Os resultados gerados podem ser plotados em um diagrama tipo “Van Krevelen” (**Figura 8**) onde pode ser identificado e classificado o tipo de querogênio existente na amostra (Espitalié et al., 1985), a saber:

- a) Tipo I: matéria orgânica rica em hidrogênio e pobre em oxigênio, sendo excelente para geração tanto de hidrocarbonetos líquidos quanto gasosos. É associado a origem lacustre, e contém valores mais altos de IH (> 600-700 mgHC/ gCOT) e baixos valores de IO (< 100 mgCO₂/gCOT);
- b) Tipo II: matéria orgânica menos rica em hidrogênio do que o tipo anterior, embora ainda seja adequada à formação de grandes volumes de hidrocarbonetos. A origem é associada, majoritariamente, a biomassa marinha, os valores de IO permanecem próximos aos do Tipo I e o IH está entre 400-700 mgHC/ gCOT;

c) Tipo III: matéria orgânica contendo muito oxigênio e pouco hidrogênio, tem um potencial de geração de hidrocarbonetos líquidos inferior aos tipos I e II. Sendo assim, é mais propício à geração de hidrocarbonetos gasosos e tem sua origem atribuída à um ambiente essencialmente terrestre (vegetais superiores), além disso, é caracterizado por apresentar baixos valores de IH (< 300 mgHC/gCOT) e altos teores de IO (100-200 mgCO₂/gCOT);

d) Tipo IV corresponde a matéria orgânica oxidada, não possuindo qualquer potencial para geração de óleo ou gás.

Figura 8 - Diagrama tipo van Krevelen.



Fonte: Modificado de Espitalié et al., 1985

De acordo com Espitalié et al. (1985), utilizando os valores de S₂ e de IH, é possível inferir outras informações referentes ao potencial gerador presente em determinado sedimento, a saber (Tabela 2; Tabela 3):

Tabela 2 - Relação entre os valores do pico S2 e a classificação de potencial associado.

S2(mgHC/ gRocha)	Pontencial Gerador
< 2	Baixo
2 – 5	Moderado
5 - 10	Bom
> 10	Excelente

Fonte: Espitalié et al.,1985.

Tabela 3 - Relação entre os valores de IH e o tipo de hidrocarbonetos gerados.

IH (mgHC/ gCOT)	Hidrocarbonetos Gerados
< 200	Gás
200 – 300	Gás e Condensado
> 300	Óleo

Fonte: Espitalié et al.,1985.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fácies Sedimentares

Por meio da análise macroscópica, e valendo-se dos preceitos de análise fácies sensu Walker (1992), foi possível caracterizar nos testemunhos de sondagem dos poços GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO 12 fácies sedimentares, especificadas a seguir na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Fácies sedimentares definidas para os testemunhos de sondagem GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO, onde NBOT é nível de base de ondas de tempestade e NBON é nível de base de ondas normais (continua).

Fácies	Aspectos Descritivos Principais	Interpretação
F1	Folhelho e siltito laminado, com intercalações eventuais de delgados níveis (milimétricos) de siltito ou arenito muito fino. Predomínio de tons cinza escuro e preto. Bioturbação ausente ou fraca.	Predomínio de decantação nas porções mais distais da plataforma (<i>offshore</i>), abaixo do NBOT, com rara e eventual ação de correntes de fundo. Condições de fundo redutoras.
F2	Folhelho e siltito laminados a maciços, de coloração cinza claro a cinza médio, intercalados com lâminas milimétricas e centimétricas de arenito muito fino, branco, laminado a maciço. Apresenta-se, em geral, moderadamente bioturbado.	Predomínio de decantação na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , abaixo do NBON. Condições de fundo predominantemente oxidantes, com ocasionais variações para condições redutoras.
F3	Siltitos, em geral cinza-claros, maciços ou incipientemente laminados, moderada a intensamente bioturbados, com intercalações de níveis centimétricos a decimétricos de arenito muito fino a fino, laminado, maciço ou, eventualmente, apresentando HCS.	Predomínio de decantação, com registro de ação de eventos de mais alta energia (ondas e/ou correntes), na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , entre o NBON e o NBOT. Condições de fundo predominantemente oxidantes, com ocasionais variações para condições redutoras.

Tabela 5 - Fácies sedimentares definidas para os testemunhos de sondagem GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO, onde NBOT é nível de base de ondas de tempestade e NBON é nível de base de ondas normais (continuação).

Fácies	Aspectos Descritivos Principais	Interpretação
AH1	Folhelho e/ou siltito laminados, com coloração cinza escura, intercalados com siltito e/ou arenito muito finos a fino de coloração cinza claro a branco, formando acamamento heterolítico lenticular. Razão Finos: Areia variando de 3:1 a 5:1. Os níveis arenosos apresentam laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Fracamente bioturbado.	Decantação associada a processos trativos (ondas e correntes) nas porções mais distais da plataforma (<i>offshore</i>), próximo ao NBOT
AH2	Folhelho e ou/siltito fracamente laminados, com coloração cinza escura, intercalados com siltito e/ou arenito muito fino a fino de coloração cinza claro a branca, formando acamamento heterolítico lenticular a pouco ondulado. Razão Finos: Areia variando de 2:1 a 1:2. Os níveis arenosos apresentam laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Moderadamente bioturbado.	Decantação associada a processos trativos (ondas e correntes) na transição entre o shoreface e o offshore, entre o NBON e o NBOT
AH3	Siltito fracamente laminado, com coloração cinza clara a cinza médio, intercalados com arenito muito fino a fino de coloração cinza claro a branca, formando acamamento heterolítico fláser. Razão Finos: Areia variando de 1:3 a 1:5. Os níveis arenosos apresentam Laminações cruzadas por onda e plano-paralelas. Níveis avermelhados estão presentes. Moderada a intensamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes) associados a decantação na transição entre o <i>shoreface</i> e o <i>offshore</i> , próximo ao NBON.
A1	Arenito e arenito argiloso muito fino a fino com laminações cruzadas por onda (WCL), laminações plano-paralelas e estratificação cruzada <i>hummocky</i> (HCS). Predomínio de coloração cinza claro a branco. Em geral, apresenta-se fracamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes) no <i>shoreface</i> , acima do NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.

Tabela 6 - Fácies sedimentares definidas para os testemunhos de sondagem GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO, onde NBOT é nível de base de ondas de tempestade e NBON é nível de base de ondas normais (conclusão).

Fácies	Aspectos Descritivos Principais	Interpretação
A2	Arenito e arenito argiloso muito fino a médio, em geral, maciços/mosqueados. Predomínio de coloração cinza claro a branca, com níveis e nódulos de coloração avermelhada. Intensamente bioturbado.	Processos trativos (ondas e correntes), associados à sedimentação no <i>shoreface</i> , acima do NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
AI1	Arenito médio a grosso, cinza, em geral, maciço e apresentando intercalações de arenito médio e siltito preto, intensamente bioturbado.	Processos trativos ocorrentes na parte <i>shoreface</i> , próximo ao NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
AI2	Arenito médio a grosso, acinzentado, bem selecionado, em geral, maciço, fracamente bioturbado e apresentando intercalações de arenito médio estratificado e siltito preto.	Processos trativos relacionado a sedimentação na parte <i>foreshore</i> , próximo ao NBON. Condições de fundo, predominantemente, oxidantes.
C	Conglomerado matriz suportada formado por arcabouço composto por grânulos de quartzo, em geral, subangulosos, brancos, oligomítico e uma matriz arenosa formada por areia média a grossa, acinzentada a cinza, maciça.	Processos trativos na porção distal na parte <i>shoreface</i> , acima do NBOT. Condições turbulentas de fundo.
T	Ciclos <i>finning up</i> com arenito fino a muito fino, branco, com estratificação plano-paralela na base e intercalações de arenito fino e siltito preto, intensamente bioturbado no topo.	Ocorre na transição com a <i>shoreface</i> , em uma plataforma dominada por tempestades, acima do NBOT.

Fonte: A autora, 2021.

As indicações das descrições detalhadas de fácies nos poços GABRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO são apresentadas nos **Apêndices K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z e AA**.

Com base na faciologia e nos dados geoquímicos e conciliando com a bibliografia, foi possível delimitar as unidades nos poços. No poço GASBRAS-1-RS-TO, o contato da Fm. Cabeças com a Fm. Pimenteiras ocorre em 8,5 m de profundidade, enquanto que o contato da Fm. Pimenteiras com a Fm. Itaim ocorre em 264,9 m de profundidade. Já no poço GABRAS-2-RS-TO, foram reconhecidos dois contatos, quais

sejam: Fm. Pimenteiras com a Fm. Itaim em 208,0 m de profundidade, e Fm. Itaim com a Fm. Jaicós em 324,5 m de profundidade.

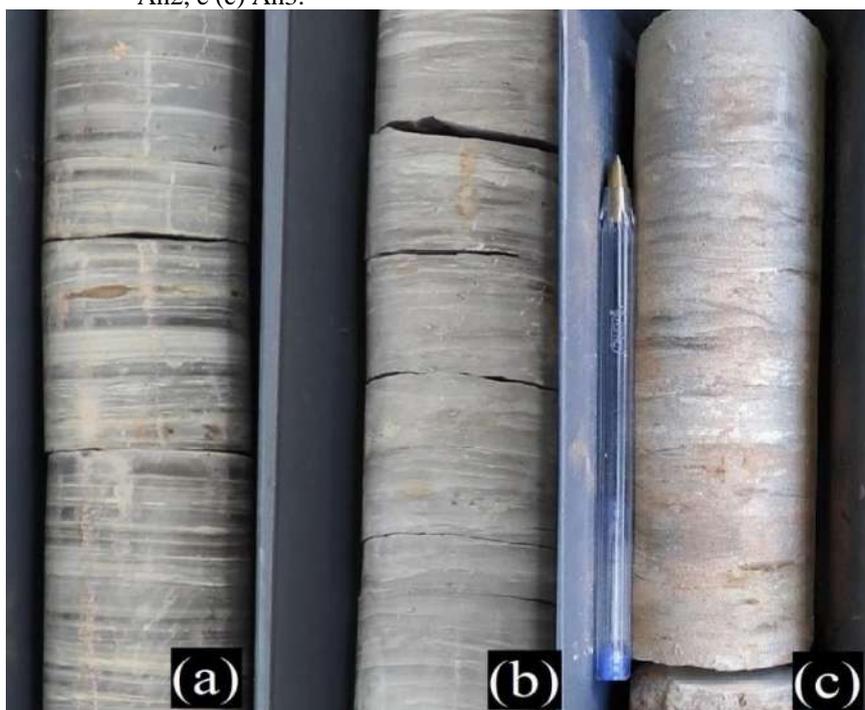
Assim, a distribuição dessas unidades litoestratigráficas nos dois poços seria:

- a) GASBRAS-1-RS-TO – Fm. Itaim (231,0 m - 283,8 m); Fm. Pimenteiras (8,5 m – 231,0 m); e Fm. Cabeças (3,5 – 8,5 m);
- b) GABRAS-2-RS-TO – Fm. Jaicós (334,8 m – 324,5m); Fm. Itaim (324,5 m – 207,5 m); e Fm. Pimenteiras (207,5 – 15,5 m).

Combinando o registro de ambos os poços, se constata que a Formação Pimenteiras apresenta nesta área da bacia uma espessura de 222,5 m, enquanto que a Formação Itaim apresenta uma espessura de 116,5 m.

As **figuras 9, 10, 11, 12, 13 e 14** exemplificam as fácies, em comum, encontradas nos supracitados poços, que são: F1, F2, Ah1, Ah2, Ah3, A1 e A2. Excepcionalmente, a **figura 14C** mostra a ocorrência de conglomerados pertencentes a Fm. Jaicós.

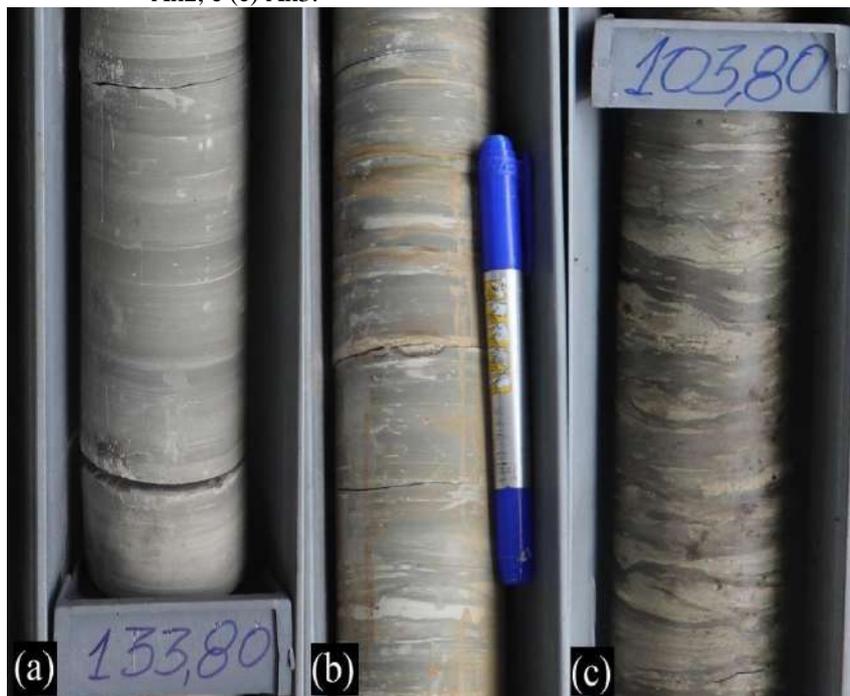
Figura 9 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo (a) Ah1, (b) Ah2, e (c) Ah3.



Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo: (a) AH1 – siltito cinza médio a escuro, com laminação incipiente, com intercalações milimétricas de arenito muito fino, branco, laminado, com esparsos nódulos de sulfetos, razão Siltito: Arenito cerca de 3:1; (b) AH2 – interlaminado siltito cinza claro e arenito muito fino, com bioturbação moderada a intensa, razão Siltito:Arenito cerca de 1:1; e (c) AH3 – arenito muito fino, branco-acinzentado, interlaminado com silito cinza claro, exibindo aspecto mosqueado por intensa bioturbação, razão Siltito: Arenito de cerca de 1:5.

Fonte: A autora, 2021.

Figura 10 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo (a) Ah1, (b) Ah2, e (c) Ah3.



Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo: (a) AH1 – siltito cinza médio, com laminação incipiente, contendo intercalações de lâminas milimétricas de arenito muito fino branco; (b) AH2 – interlaminado siltito cinza claro e arenito muito fino, esbranquiçado, fracamente bioturbado, em acamamento wavy e com razão Siltito: Arenito cerca de 2:1; e (c) AH3 – interlaminado arenito muito fino e siltito cinza médio, moderada a intensamente bioturbado, com ripples parcialmente preservadas (WCL?).
Fonte: A autora, 2021.

Figura 11 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo (a) F1 e (b) F2.



Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo: (a) F1 – folhelho preto, finamente laminado, físsil, com intercalações de lâminas milimétricas de arenito muito fino, branco, e razão Siltito: Arenito cerca de 5:1; e (b) F2 – Siltito cinza claro, com laminação incipiente, com intercalações de arenito muito fino, branco, maciço.

Fonte: A autora, 2021.

Figura 12 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo (a) F1 e (b) F2.



Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo: (a) F1 – folhelho cinza escuro a preto, laminado, com intercalações de lâminas milimétricas de arenito muito fino, branco, e razão Siltito: Arenito cerca de 4:1; e (b) F2 – silito cinza claro, com laminação incipiente, com intercalções de arenito muito fino, branco, maciço, fracamente bioturbado.

Fonte: A autora, 2021.

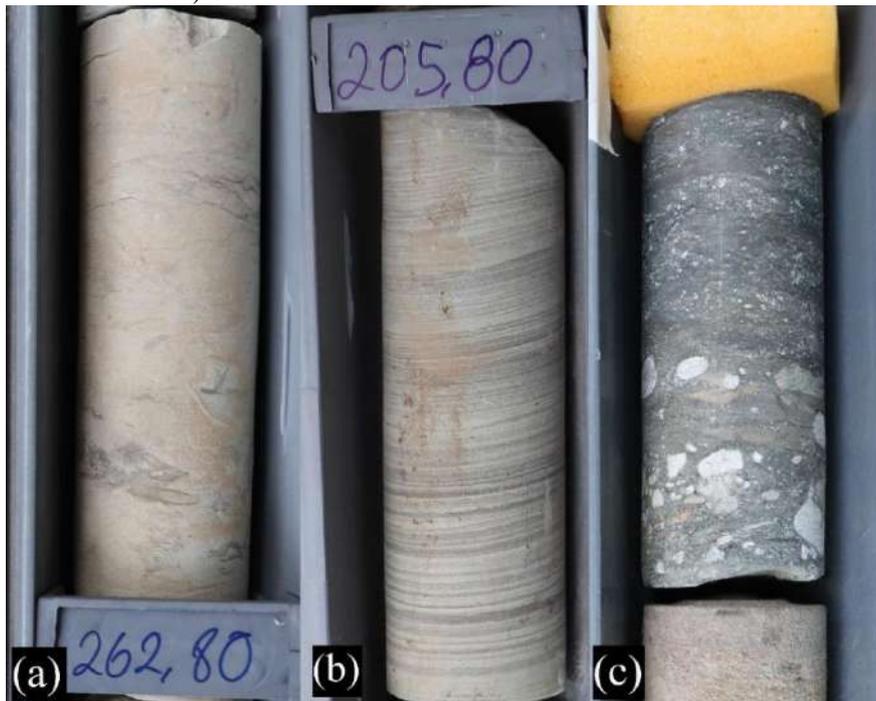
Figura 13 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo a (a) A2 e (b) A1.



Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO sendo: (a) A2 – arenito fino, argiloso, acinzentado, mosqueado por bioturbação intensa; e (b) A1 – arenito fino, branco, com WCL, fracamente bioturbado, apresentando intercalações milimétricas de siltito cinza escuro.

Fonte: A autora, 2021.

Figura 14 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo (a) A2, (b) A1 e c) C.

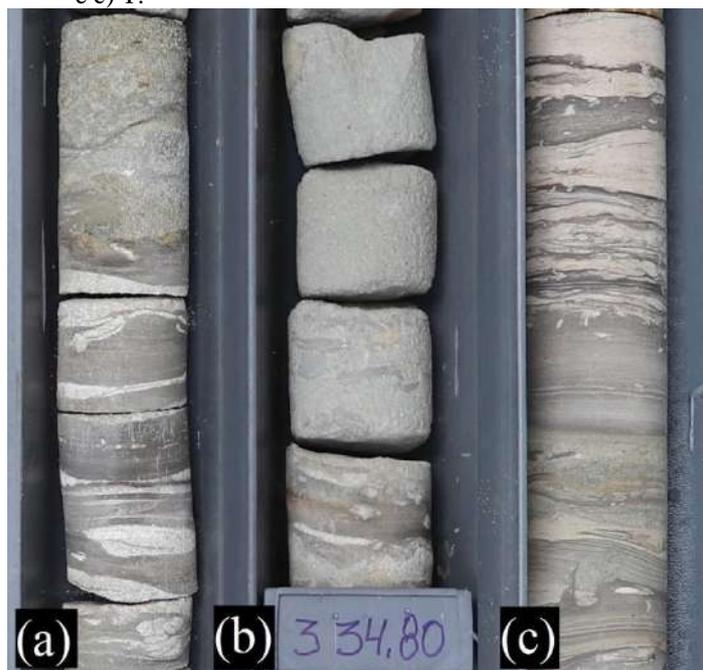


Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo: (a) A2 – arenito fino/ arenito argiloso, branco – acinzentado, mosqueado por intensa bioturbação; (b) A1 – arenito fino, branco, com lâminas milimétricas de siltito preto, com laminação trundaca de baixo ângulo/ HCS; e c) C – pulsos conglomeráticos centimétricos de afinamento granulométrico para o topo, no caso, de conglomerado gradando para arenito conglomerático com estratificação incipiente.

Fonte: A autora, 2021.

A **figura 15** evidencia as fácies reconhecidas apenas no testemunho de sondagem GASBRAS-2-RS-TO, tais associações são referentes a Fm. Jaicós.

Figura 15 - Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo (a) AI1, (b) AI2 e c) T.



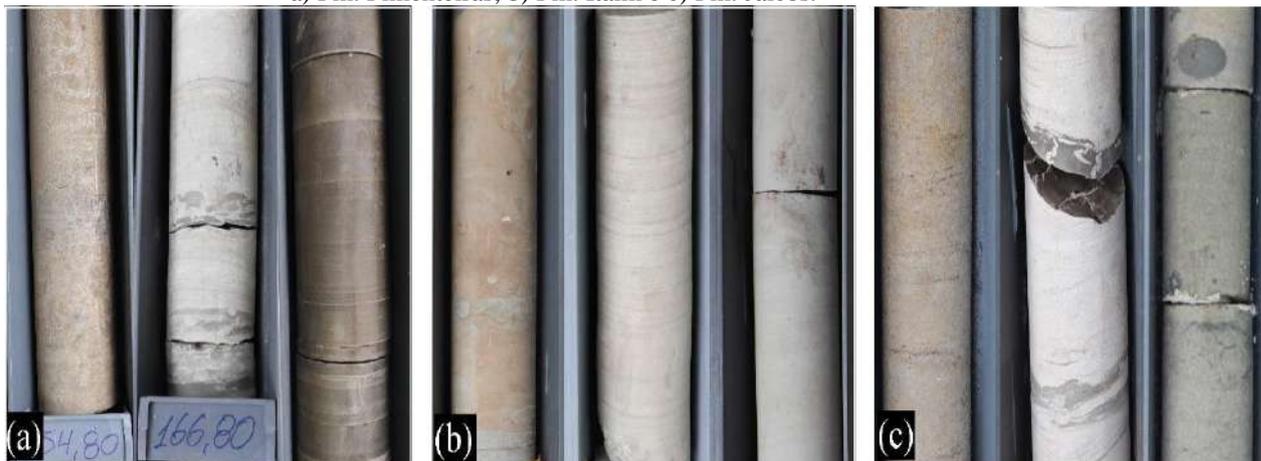
Nota: Fácies encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO sendo: (a) AI1 – arenito grosso/muito grosso, acinzentado, com laminação incipiente, intercalado com interlaminado de silito preto/pulsos de arenito fino com *ripples* e com estruturas de carga; (b) AI2 – arenito grosso/ muito grosso, acinzentado, maciço a incipientemente estratificado, contendo intraclastos argilosos na base do estrato; e c) T – ciclos *finning up* com arenito fino a muito fino, branco, com estratificação plano-paralela/ WCL na base, e intercalações de arenito fino e silito preto, intensamente bioturbado no topo
Fonte: A autora, 2021.

4.2 Estruturas e Litologias

Com a descrição em escala de detalhe, foi possível identificar nos testemunhos diferentes variações litológicas em suas extensões, como: arenito branco, arenito avermelhado, silito (**Figura 16**), conglomerado (**Figura 14c**) e folhelhos (serão, posteriormente, abordados no **item 4.2.1**).

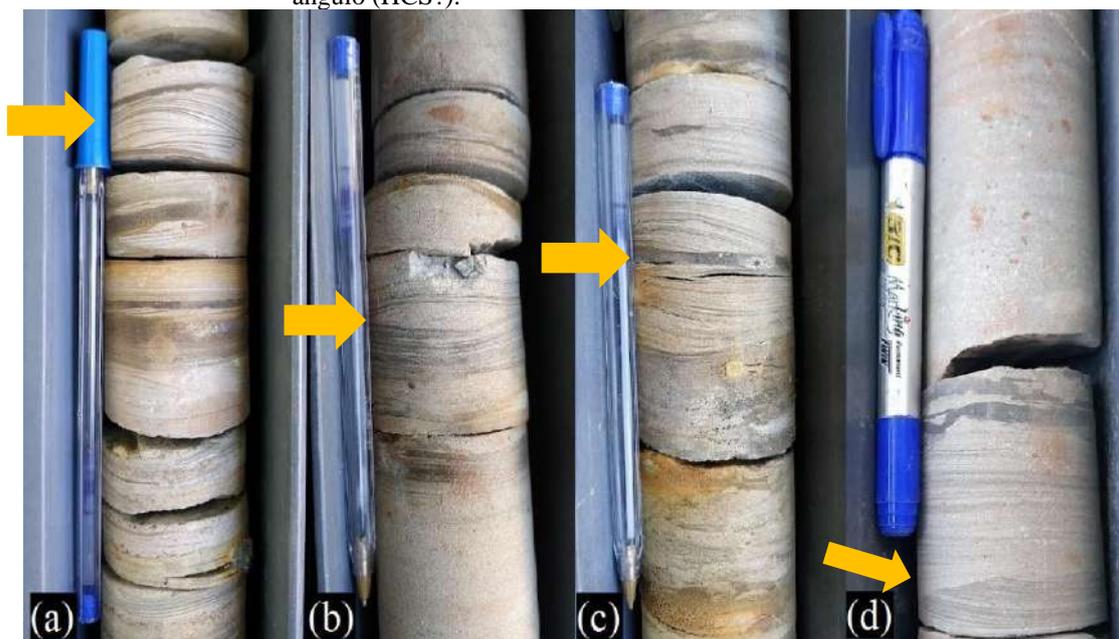
Adicionalmente, houve a identificação de aspectos estruturais marcantes a saber: estratificação plano-paralela (laminar), estratificação cruzada Hummocky (HCS), estratificação cruzada (WCL), estratificação de baixo ângulo. Outras estruturas singulares também foram descritas, por exemplo: bioturbação, estrutura de carga e nódulos de sulfeto (**Figura 17, 18, 19 e 20**).

Figura 16 - Exemplos de litologias encontradas nas Formações estudadas, tais como:
a) Fm. Pimenteiras; b) Fm. Itaim e c) Fm. Jaicós.



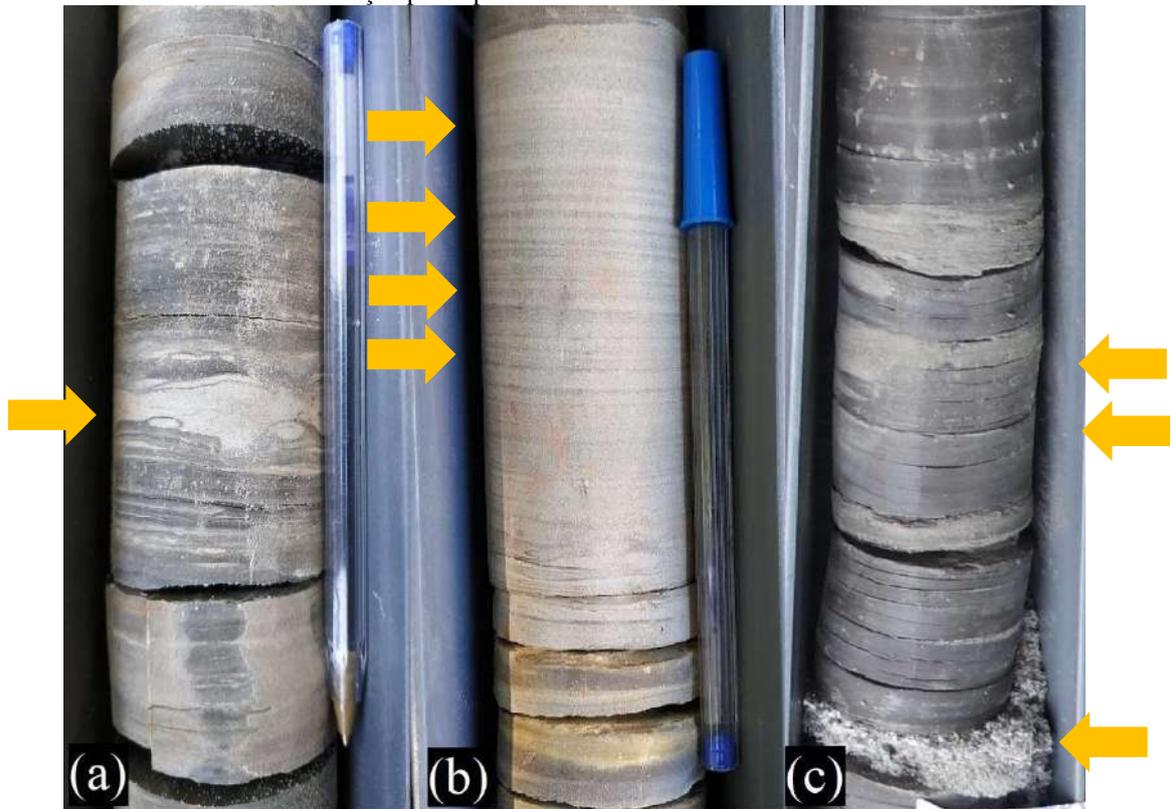
Fonte: A autora, 2021.

Figura 17 - Tipos de estratificações encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO, a saber: a) HCS; b) WCL; c) WCL; e d) truncamento de baixo ângulo (HCS?).



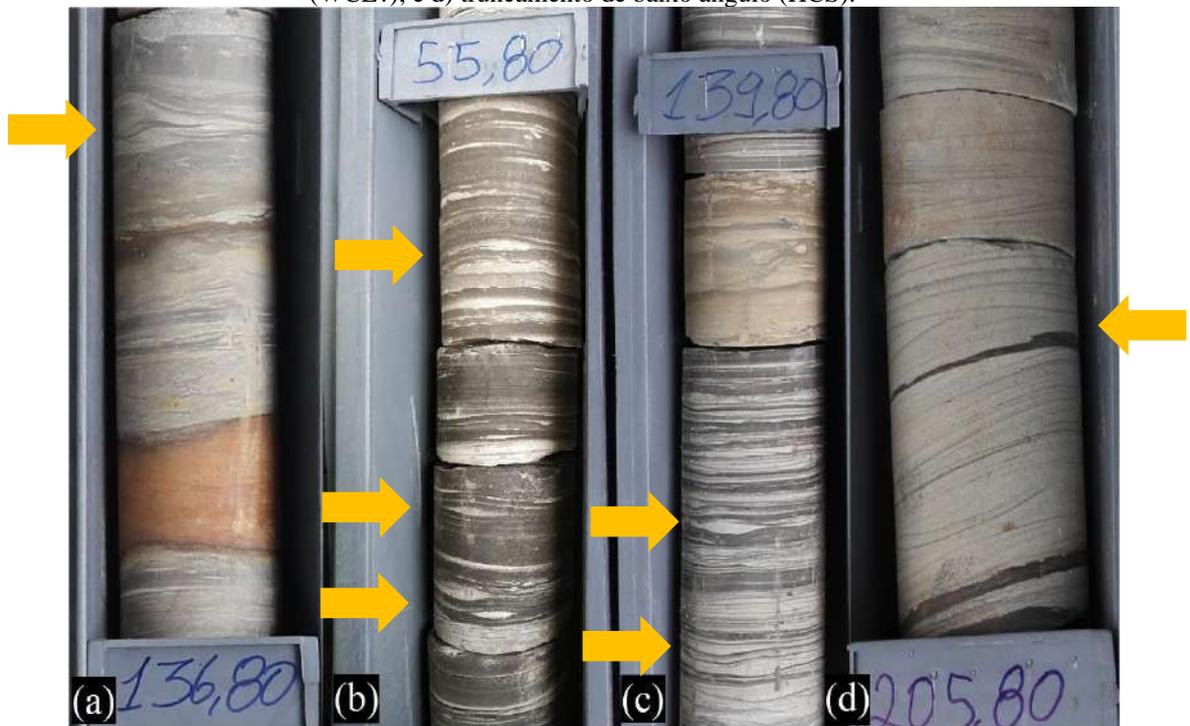
Fonte: A autora, 2021.

Figura 18 - Estruturas encontradas no poço GASBRAS-1-RS-TO, a saber: a) estrutura de carga; b) estratificação plano-paralela e c) laminação plano paralela e nódulos de sulfetos alterados.



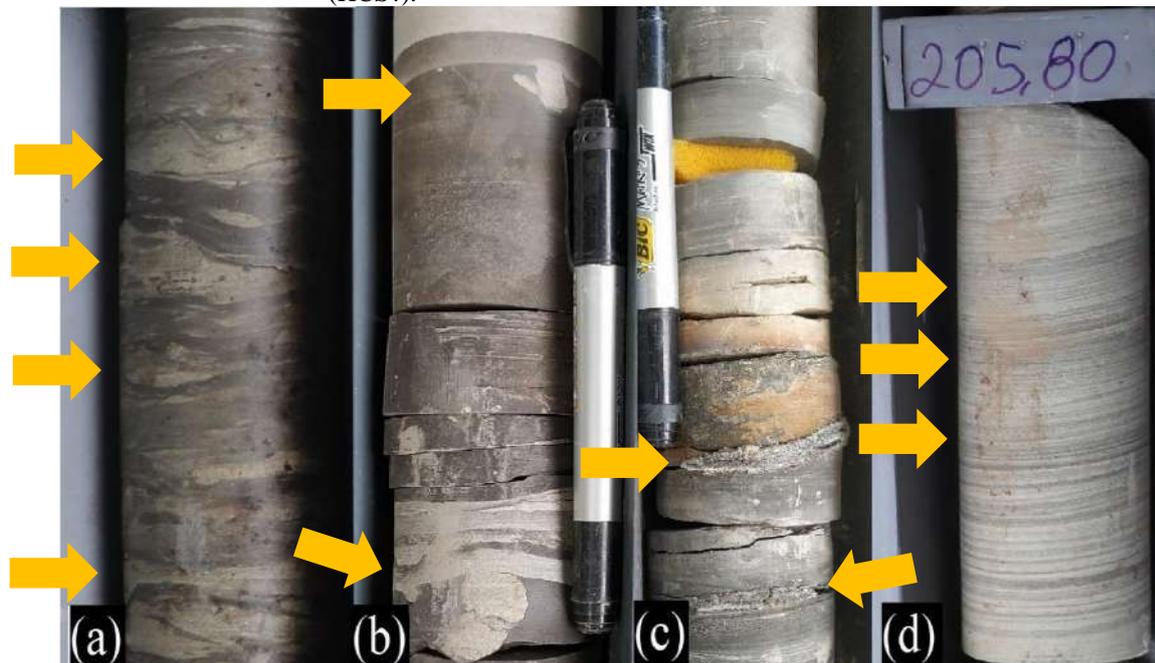
Fonte: A autora, 2021.

Figura 19 - Tipos de estratificações encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO, a saber: a) HCS; b) heterolíticas (WCL?); c) heterolíticas (WCL?); e d) truncamento de baixo ângulo (HCS).



Fonte: A autora, 2021.

Figura 20 - Estruturas encontradas no poço GASBRAS-2-RS-TO, a saber: a) bioturbação; b) estrutura de carga; c) nódulos de sulfetos; e d) estratificação plano-paralela/ truncamento de baixo ângulo (HCS?).



Fonte: A autora, 2021.

A análise descritiva do poço GABRAS-1-RS-TO permitiu a identificação de dois registros fossilíferos, respectivamente, na Fm. Pimenteiras e na Fm. Itaim, quais sejam: fósseis de Braquiópodes indeterminados em 14,0 m de profundidade (**Figura 21**) e icnofósseis indeterminados como, por exemplo, em 275,8 m (**Figura 22**). A caracterização desses registros necessita de estudos aprofundados em pesquisas posteriores.

Figura 21 - Fósseis de Braquiópodes indeterminados (?) encontrados no poço GASBRAS-1-RS-TO.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 22 - Icnofósseis indeterminados (?) encontrados no poço GASBRAS-1-RS-TO.



Fonte: A autora, 2021.

4.3 Geoquímica

4.3.1 Carbono Orgânico Total (COT)

Para a determinação desses teores, nos poços, a amostragem seguiu um espaçamento médio variando entre 0,5 m a 2,0 m, a depender da faciologia. Nos intervalos de siltitos/folhelhos laminados cinza escuros a negros, o espaçamento médio da amostragem foi de 0,5 m; já nos intervalos de siltitos cinza claros, ou interlaminados siltitos-arenitos, em geral, bioturbados, o espaçamento médio da amostragem foi de 1,0 m; enquanto que nos intervalos, predominantemente, arenosos, o espaçamento médio da amostragem foi de 2,0 m.

Foram analisadas 54 amostras coletadas na seção mais superior do poço GASBRAS-1-RS-TO, no intervalo entre 11,2 a 104,3m, para a determinação de teores de COT, S e RI. Tais análises visaram complementar a seção mais superior da formação

Pimenteiras, no seu contato sobrejacente com a Fm. Cabeças, a qual não foi completamente amostrada no poço GASBRAS-2-RS-TO. Das 54 amostras, a grande maioria, apresentaram valores de COT expressivos, acima de 1,0%, enquanto apenas 11 amostras permearam valores de 0,02% a 0,88%.

No poço GASBRAS-2-RS-TO, os valores de COT permaneceram, em geral, abaixo de 1,0 %, na maior parte da seção, exibindo, entretanto, alguns intervalos anômalos, com teores superiores a 1,0%, tanto na Formação Pimenteiras quanto na Formação Itaim. Intervalos com tendências progradacionais, retrogradacionais e agradacionais, também, são reconhecidos, definindo ciclos com diferentes magnitudes. Esses padrões serão discutidos oportunamente no texto.

O poço GASBRAS-2-RS-TO foi analisado em sua totalidade quanto à determinação dos teores de COT, S e RI, abrangendo o intervalo entre 16,70 m a 333,80 m, totalizando 299 amostras.

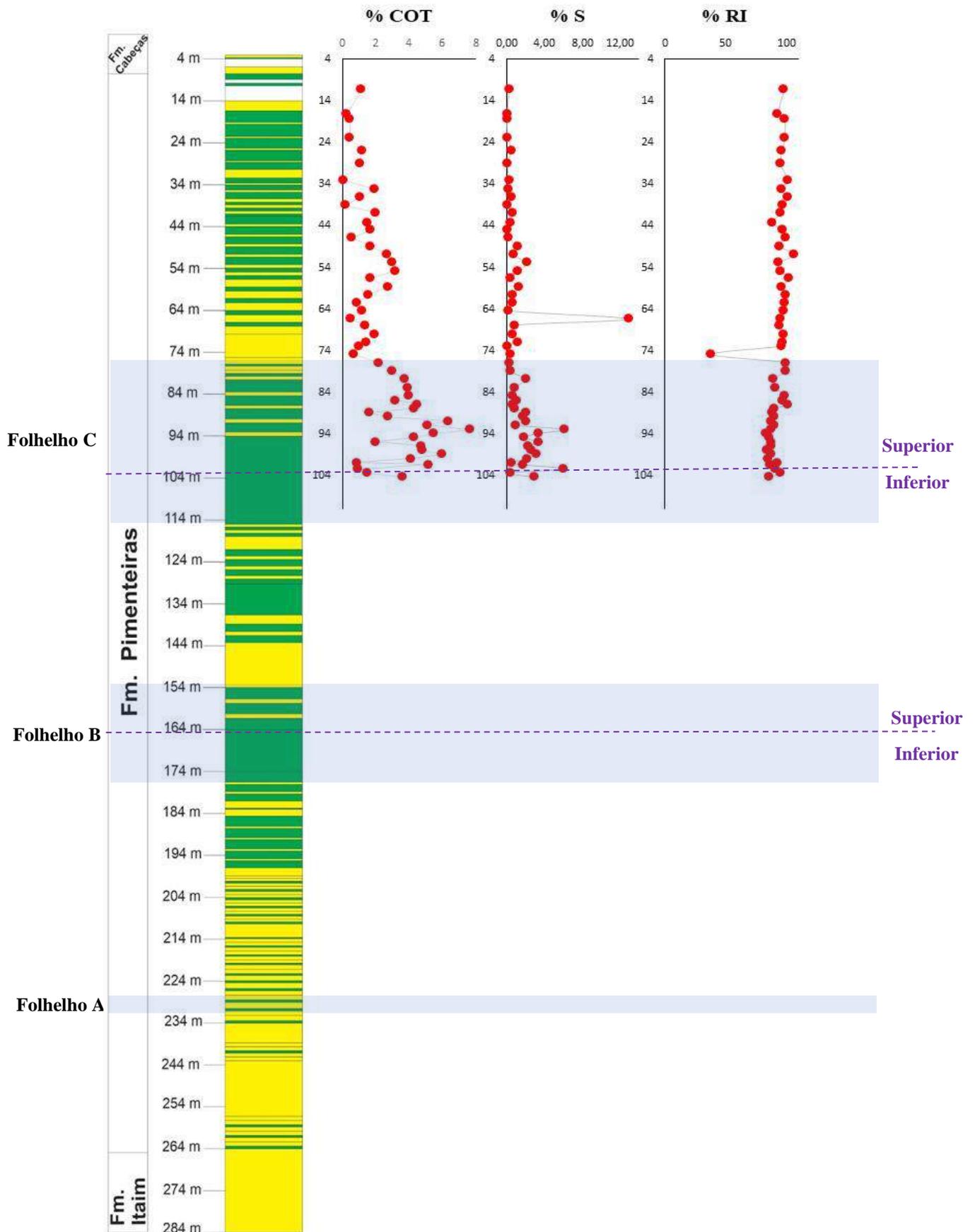
Em função das limitações impostas pela Pandemia de COVID-19, não foi possível concluir integralmente a análise de COT do poço GASBRAS-1-RS-TO e a análise de pirólise Rock-Eval para todo o poço GASBRAS-2- RS-TO.

Com isso, as análises de Pirólise no último poço se restringiram à sua seção inferior no intervalo entre 222,85 e 333,8m, com um total de 54 amostras, englobando toda a seção da Fm. Itaim, além da porção mais superior da Fm. Jaicós. Para as análises de pirólise deste intervalo, em geral, foram selecionadas as amostras que apresentaram teores de COT superiores a 1,0%, tendo sido consideradas também na seleção de amostras as tendências de variação dos teores de COT nesse intervalo.

Dessa forma, considerando as seções compostas dos dois poços analisados, toda a seção da Fm. Pimenteiras dessa área foi examinada quanto ao seu conteúdo faciológico e a análise de COT, S e RI, bem como, toda a seção da Fm. Itaim foi estudada quanto ao seu conteúdo faciológico, análise de COT, S, RI e pirólise *Rock-Eval*.

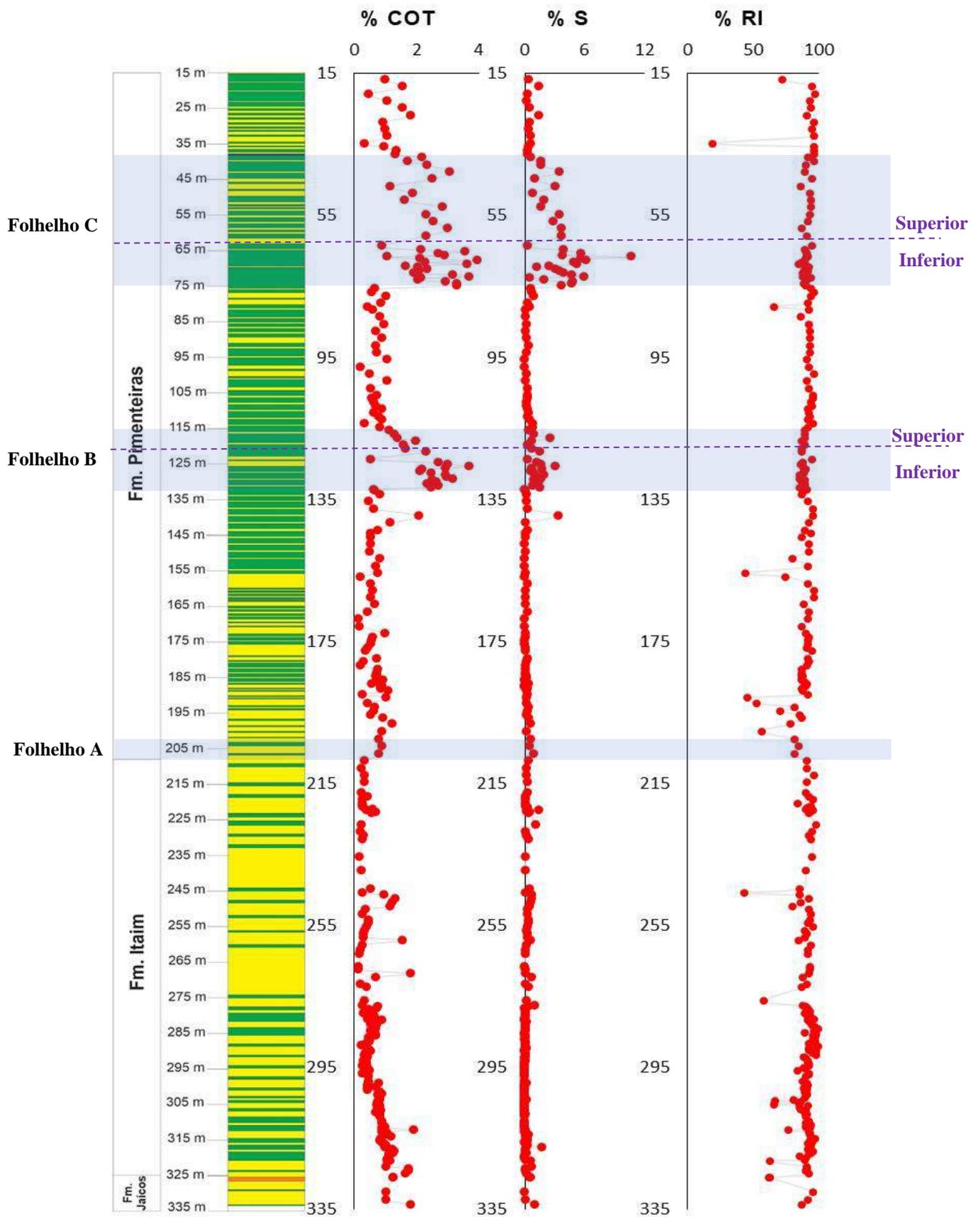
Os resultados das análises de COT, S e RI nos poços GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO são demonstrados respectivamente nas **Figuras 23 e 24**.

Figura 23 - Correlação entre litologia e geoquímica do poço GASBRAS-1-RS-TO.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 24 - Correlação entre litologia e geoquímica do poço GASBRAS-2-RS-TO.



Fonte: A autora, 2021.

F3

No âmbito da Formação Pimenteiras, os resultados de COT supracitados e a análise faciológica permitiram a identificação e delimitação de três intervalos, potencialmente favoráveis para a geração de hidrocarbonetos, em cada um dos poços analisados. Esses foram associados aos três intervalos geradores (folhelhos A, B e C, a partir da base) definidos, originalmente, por Rodrigues (1995). Dessa forma, o presente trabalho manteve as denominações de Rodrigues (1995).

As características principais, em termos faciológicos e em termos de teores de COT, dos mencionados intervalos geradores, nos dois poços analisados, são as seguintes:

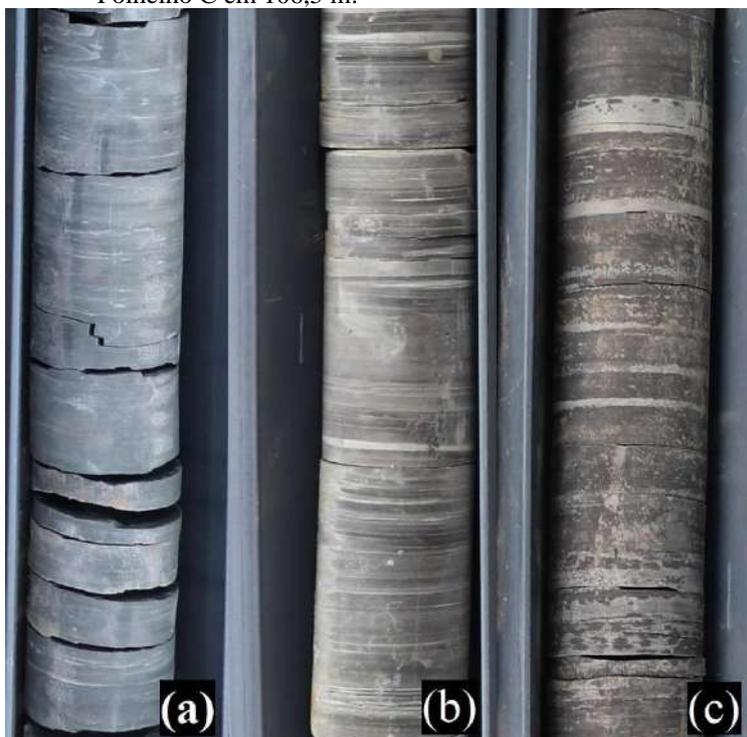
- a) **GASBRAS-1-RS-TO (Figura 23; Figura 25):** É importante ressaltar que as zonas geradoras foram separadas a partir da análise faciológica e de dados geoquímicos preliminares, como também, foi feita a correlação com o outro poço aqui estudado.

Folhelho C concerne ao intervalo gerador estendendo-se de 76,8 m a 114,5 m, onde a análise preliminar permitiu identificar o teor médio de COT, de 3,23%. Com base nas características faciológicas, este intervalo pode ser subdividido em dois subintervalos, a saber: superior, de 76,8 m a 101,3 m; e inferior, de 103,8 m a 114,5 m, sendo que o subintervalo inferior é aquele que contém as melhores características de rocha geradora, constituindo-se em um seção de folhelhos pretos finamente laminados, com ausência de bioturbações e pequenos nódulos dispersos de pirita, enquanto que o subintervalo superior exhibe a mesma litologia, porém apresentando um ligeiro aumento nas intercalações de níveis milimétricos a centimétricos de arenito muito fino com WCL.

Folhelho B é o intervalo principal é de 153,6 m a 175,0 m, onde há a identificação de dois subintervalos, que são: superior, de 153,6 m a 161,8 m; e inferior, de 164,3 m a 175,0 m. Quanto as características, é constituído por uma seção de folhelhos pretos finamente laminados, com ausência de bioturbações, enquanto que o subintervalo superior exhibe a mesma litologia, porém apresentando um ligeiro aumento nas intercalações de níveis milimétricos a centimétricos de arenito muito fino com WCL.

Folhelho A se trata do intervalo principal, possivelmente, consiste em 227,8 m a 231,0 m (?), É composto por uma seção de folhelhos/ siltitos cinza escuros, com laminação incipiente, intercalados milimetricamente por arenitos muito fino, branco, intensamente bioturbado e com WCL.

Figura 25 - Folhelhos geradores encontrados no poço GASBRAS-1-RS-TO, sendo:
a) Folhelho A em 230,8 m; b) Folhelho B em 164,7 m; e c)
Folhelho C em 106,5 m.



Fonte: A autora, 2021.

b) GASBRAS-2-RS-TO (Figura 24; Figura 26):

Folhelho C diz respeito ao intervalo gerador estendendo-se de 36,5 m a 74,6 m, cujo COT médio é de 2,38% (37 amostras).

Com base nas características faciológicas e nos dados de COT, esse intervalo pode ser subdividido em dois subintervalos, a saber: superior, de 36,5 m a 60,6 m, onde o COT médio é de 2,14% (15 amostras); e o inferior, de 64,6 m a 74,6 m, no qual o COT médio é de 2,62% (21 amostras), sendo que o subintervalo inferior é aquele que reúne as melhores características de rocha geradora, constituindo-se em um seção de folhelhos pretos finamente laminados, com ausência de bioturbações e pequenos nódulos dispersos de pirita ao longo desse bloco, enquanto que o subintervalo superior exibe a mesma litologia, porém apresentando um ligeiro aumento nas intercalações de níveis milimétricos a centimétricos de arenito muito fino com WCL.

Folhelho B é o intervalo estendendo-se de 115,0 m a 132,0 m, cujo COT médio é de 2,29% (23 amostras). Adotando-se os mesmos critérios sinalizados acima, dentro deste intervalo houve também o reconhecimento de dois subintervalos: o subintervalo

superior, de 115,0 m a 121,7 m, cujo COT médio é de 1,62% (7 amostras) e o inferior, de 124,0 m a 132,0 m, com COT médio de 2,72% (15 amostras). As características faciológicas desses dois subintervalos são iguais às características dos dois subintervalos do Folhelho C, assinaladas acima.

Folhelho A concerne ao intervalo único de 203,5 m a 208,9 m, onde o COT médio atribuído é de 0,68% (3 amostras). Em termos faciológicos, nesse intervalo se observa o predomínio de folhelho/siltito cinza escuro, laminado, fracamente bioturbado, com intercalações milimétricas de arenito muito fino, com WCL.

Figura 26 - Folhelhos geradores encontrados no poço GASBRAS-2-RS-TO, sendo: a) Folhelho A em 203,8 m; b) Folhelho B em 127,8 m; e c) Folhelho C em 67,8 m.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.2 Resíduo Insolúvel (RI)

No poço GASBRAS-1-RS-TO, os resultados obtidos para o intervalo de 104,0 m de espessura da seção superior deste poço mostram que, majoritariamente, as rochas são de composição mineralógica siliciclástica, com exceção da amostra de 74,8 m de

profundidade cujo teor é de 38%, indicando que tal amostra pode ser de composição carbonática (siderita?).

No testemunho GASBRAS-2-RS-TO, os altos teores de RI indicam que as amostras apresentam composição essencialmente siliclástica, pois estes foram maiores ou iguais a 80%. Já em 14 amostras (16,7 m; 34,7 m; 155,8 m; 156,8 m; 191,0 m; 192,5 m; 200,4 m; 245,9 m; 276,4 m; 304,6 m; 305,5 m; 312,85 m; 321,5 m; e 326,2 m), os resultados intervalaram entre 19% e 77%, indica que parte dessas amostras sejam níveis compostos por carbonatos, seja parcial ou predominantemente.

4.3.3. Enxofre Total (S)

A maior parte das amostras do topo do testemunho de sondagem GASBRAS-1-RS-TO mostraram valores baixos de enxofre, contudo, de 66,3 m a 104,3 m, observa-se que os valores de S permeiam entre 1,67% a 12,9%, o que pode indicar um período de anoxia no sistema, favorecendo o acúmulo de enxofre, com exceção de 13 amostras (67,8 m; 69,9 m; 72,8 m; 74,8 m; 76,8 m; 78,8 m; 82,8 m; 84,8 m; 86,8 m; 87,8 m; 91,8 m; 100,8 m; 103,3 m) cujos teores oscilaram entre 0,02% a 0,97% os quais indicam ambiente óxido, resultando nessa diminuição de S.

Os dados da análise geoquímica no poço GASBRAS-2-RS-TO demonstram que há, pelo menos, dois momentos no tempo geológico no qual a deposição ocorreu em um ambiente redutor (anóxico). Tal ideia é corroborada pela taxa alta de %S em dois momentos, quais sejam: de 39,7 m a 74,7 m de profundidade, onde os teores notáveis variaram de 1,62% a 10,7%; e de 121,7 m a 129,2 m de profundidade, no qual os valores principais permearam em 1,51% a 3,05%. É notável que nesse último ciclo mencionado, as quantidades elevadas de %S foram intercaladas por breves momentos nos quais o sistema, possivelmente, deve ter estado menos redutor o que culminou em taxas mais baixas de %S (0,32% a 0,90% em 4 de 12 amostras).

Considerações sobre as Relações COT : S nos intervalos dos Folhelhos A, B e C e suas implicações quanto ao caráter deposicional eventualmente anóxico neste intervalos são encaminhadas no **item 4.4.2.1**.

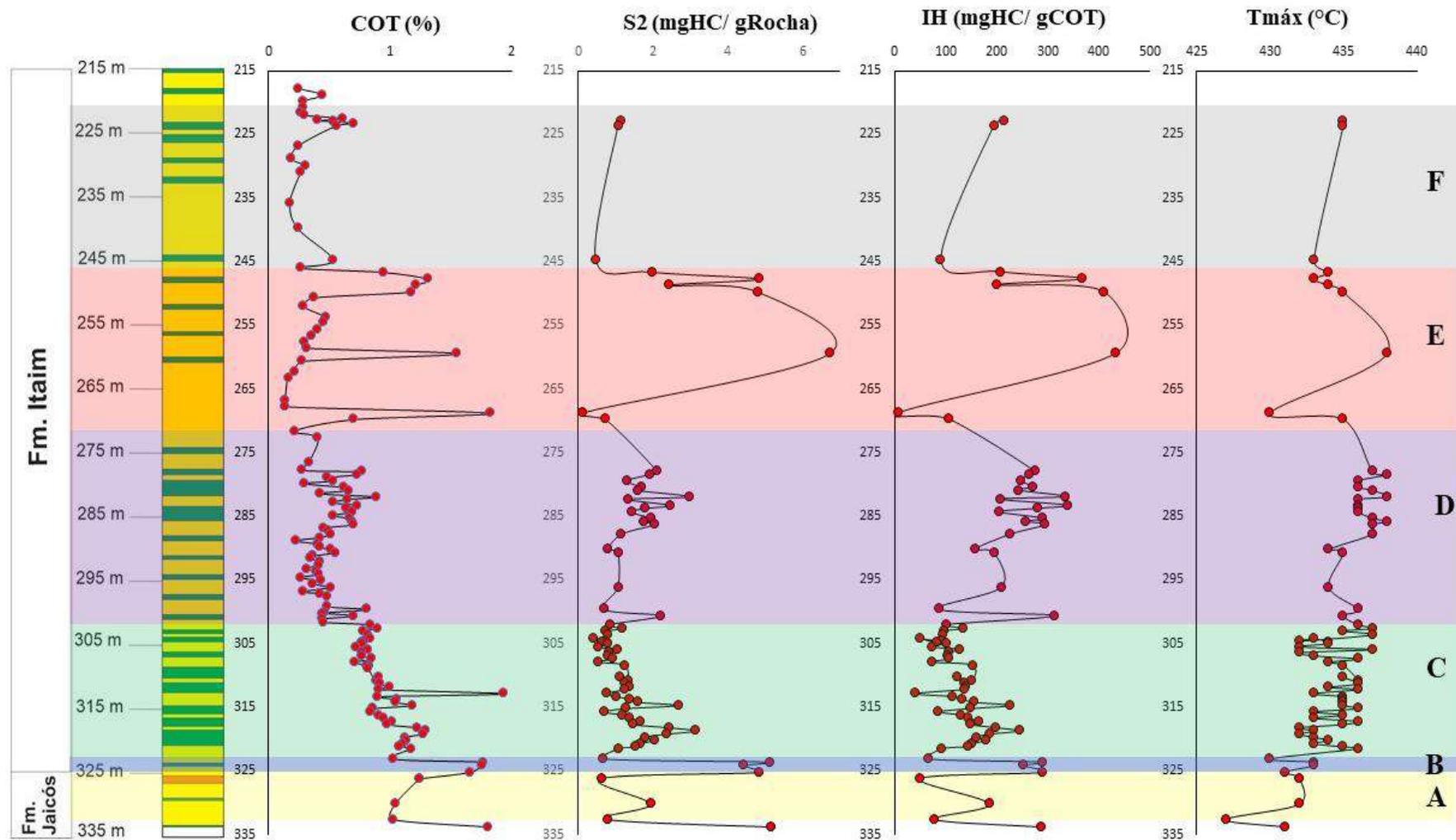
4.3.4 Pirólise Rock-Eval

Os dados obtidos na pirólise são provenientes da seção inferior do poço GASBRAS-2-RS-TO, englobando toda a seção da Fm. Itaim, além da seção mais superior da Fm. Jaicós amostrada neste poço. São ao todo 77 amostras localizadas de 222,8 m a 312,8 m de profundidade. As análises referentes à Formação Pimentairas não puderam ser realizadas, em função das limitações impostas pela Pandemia de COVID-19.

Baseado no resultado da análise de Pirólise e COT, foi possível subdividir a seção da Formação Itaim em cinco unidades quimioestratigráficas (denominadas de B a F, a partir da base), uma sexta unidade quimioestratigráfica (A), referente à seção mais superior da Formação Jaicós subjacente, foi também identificada (**Figura 27**).

Essas seis unidades quimioestratigráficas caracterizadas são descritas a seguir no que tange a litologia, geoquímica e potencial gerador de hidrocarbonetos.

Figura 27 - Resultados de COT e pirólise parcial do poço GASBRAS-2-RS-TO.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.4.1. Unidade A

É composta por quatro amostras pertencentes ao topo da Fm. Jaicós (326,20 m; 330,20 m; 332,60 m e 333,80 m), sendo constituída por: arenito médio a grosso, bem selecionados, fracamente bioturbados e interlaminados finamente por arenitos finos e siltitos; arenitos médios a grossos, bem selecionados, estratificados e fracamente bioturbados; passando para arenitos maciços a intensamente bioturbados, intercalados por siltitos; ciclos *finning up* arenitos finos estratificados a siltitos bioturbados; sucedidos por conglomerados.

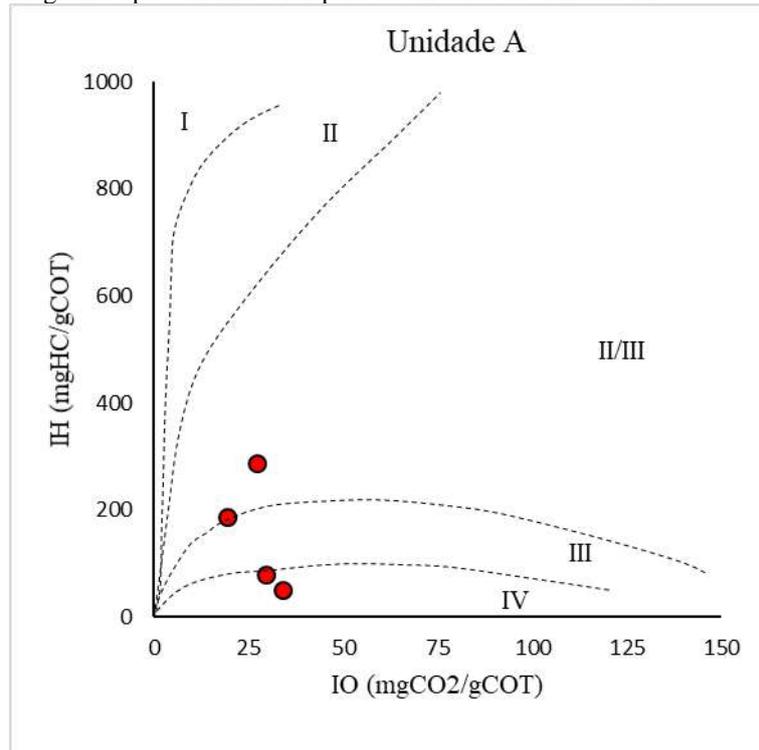
Essas amostras apresentam 1,02% a 1,80% de COT, o que poderia indicar rochas potencialmente geradoras de hidrocarbonetos, contudo, são amostras de níveis pelíticos de espessuras centimétricas a decimétricas intercalados em litologias predominantemente areno-conglomeráticas da seção superior da Formação Jaicós. Tal fato impossibilita relacionar essa unidade a uma camada de interesse econômico para geração de hidrocarbonetos.

O tipo de querogênio contido nessa seção corresponde a uma oscilação entre matéria orgânica do Tipo II/III e do Tipo IV (**Figura 28**). Ou seja, nessa seção há matéria orgânica com algum hidrogênio e com baixo teor de oxigênio, e também, matéria orgânica oxidada. Enquanto a primeira teria boas condições de gerar volumes de gás e condensado, a segunda, não possui quaisquer potencial para geração dos mesmos.

Os valores obtidos na pirólise demonstram um baixo potencial para geração de hidrocarbonetos (0,30 a 0,49 mgHC/gRocha) os quais são formados por gás e gás/condensado, uma vez que os valores de IH são variam entre 50 a 300 de mgHC/gCOT (**Figuras 29 e 30**). Ademais, a T_{máx} obtida nessas rochas (427°C e 431°C) concernem a imatura térmica.

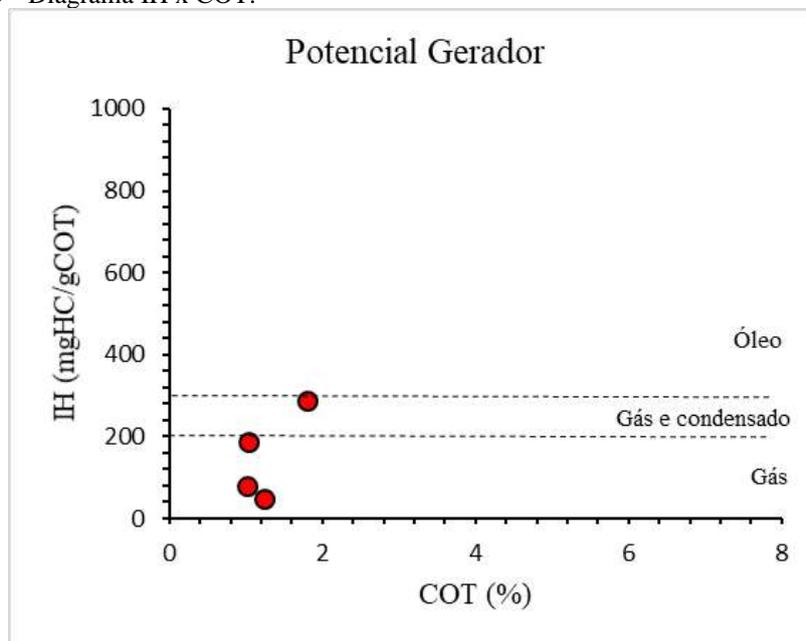
Enfatiza-se novamente que, apesar de duas amostras terem sido notados bons resultados de COT, é importante ressaltar que esses dados pertencem a pequenos níveis de sedimentos finos que ocorrem intercalados em uma seção, essencialmente, areno-conglomerática. Dessa forma, são descartadas chances de representarem rochas potencialmente geradoras de hidrocarbonetos.

Figura 28 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade A.



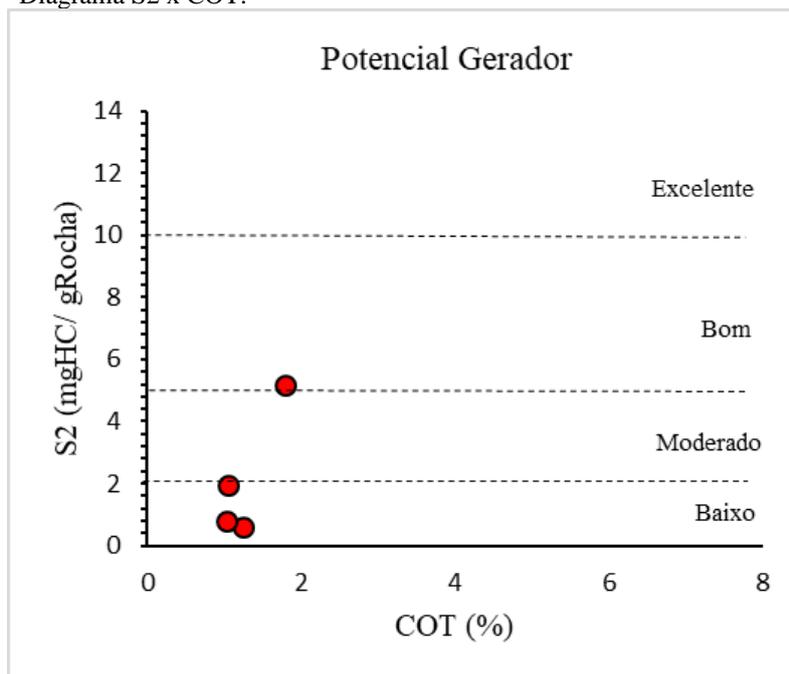
Fonte: A autora, 2021.

Figura 29 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 30 - Diagrama S2 x COT.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.4.2. Unidade B

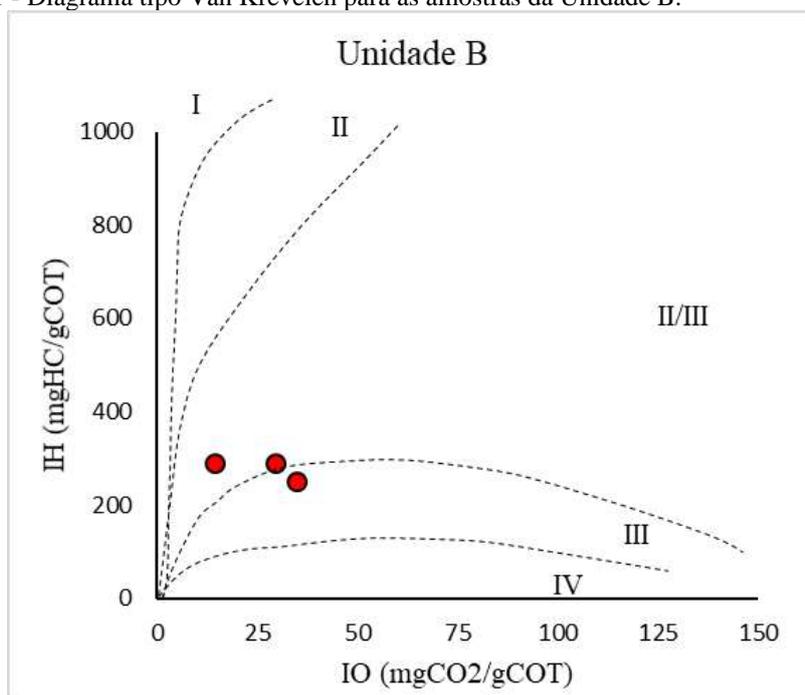
A unidade abrange três amostras da base da Fm. Itaim, a saber: 323,60 m; 324,15 m e 325,20 m, sendo constituída predominantemente por arenitos finos, avermelhados, mosqueado a intensamente bioturbados, intercalados com siltitos cinza escuros laminados.

Os teores geoquímicos encontrados nessa seção, respectivamente, são: COT (1,76%; 1,75%; 1,66%); S (0,13%; 0,07% e 0,16%); e RI (91%, 90% e 92%). Isso demonstra que tal sucessão de rochas são, majoritariamente, formada por rochas siliciclásticas, depositadas em ambiente óxido. As geradoras dessa unidade são camadas poucas espessas de siltitos intercaladas entre arenitos espessos o que justifica as boas percentagens de COT presentes, porém, não são sugestivas de intervalo com interesse para geração quando analisados a extensão do alvo de interesse econômico.

O tipo de querogênio atribuído a esse bloco é do tipo II/III a tipo III (**Figura 31**), ou seja, está correlacionada contribuição de matéria orgânica de origem marinha, com aporte considerável de material terrestre, possivelmente, de vegetais superiores, onde há bons teores de hidrogênio, mas ainda aquém do esperado para gerar grandes volumes de hidrocarbonetos.

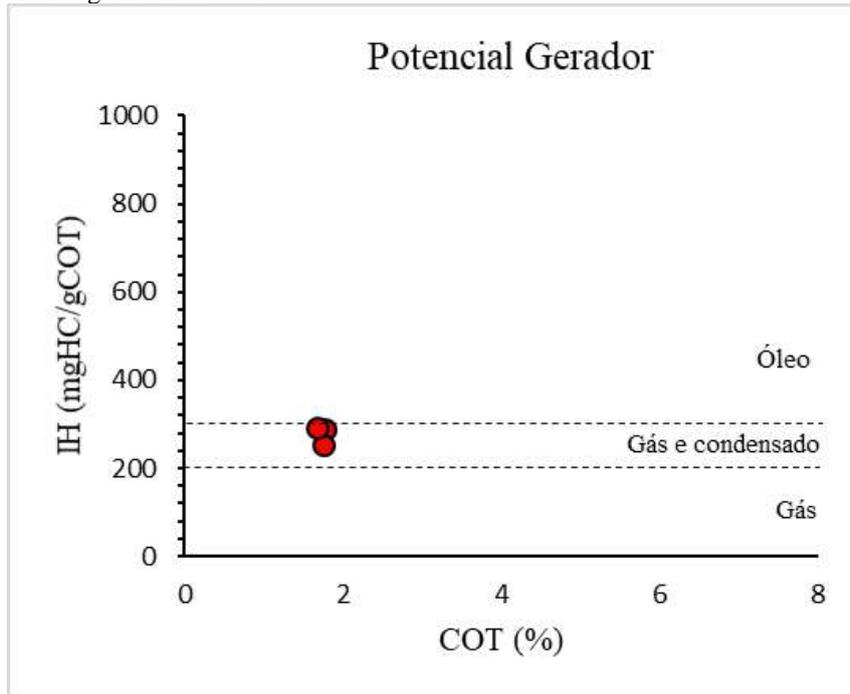
Além disso, os resultados gerados na pirólise (**Figuras 32 e 33**) são: S2 (5,11 mgHC/ gRocha; 4,42 mgHC/ gRocha; 4,83 mgHC/ gRocha); IH (290,34 mgHC/ gCOT; 252,57 mgHC/ gCOT; 290,96 mgHC/ gCOT); e Tmáx (433°C ; 433°C; 431° C). Tais dados sugerem que essa seção tem potencial para geração de hidrocarbonetos gasosos e condensados, com potencial moderado, contudo, ressalta-se que se tratam de dados de amostras pertencentes a estratos pelíticos de pequena espessura, intercalados em arenitos, além de serem rochas imaturas térmicamente (segundo, o resultado obtido na Tmáx).

Figura 31 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade B.



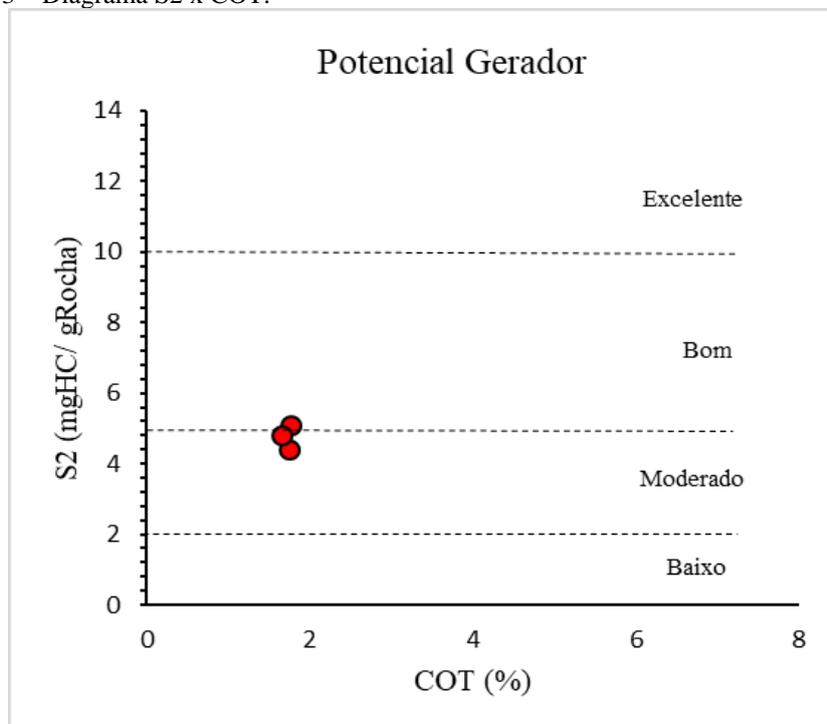
Fonte: A autora, 2021.

Figura 32 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 33 – Diagrama S2 x COT.



Fonte: A autora, 2021

4.3.4.3. Unidade C

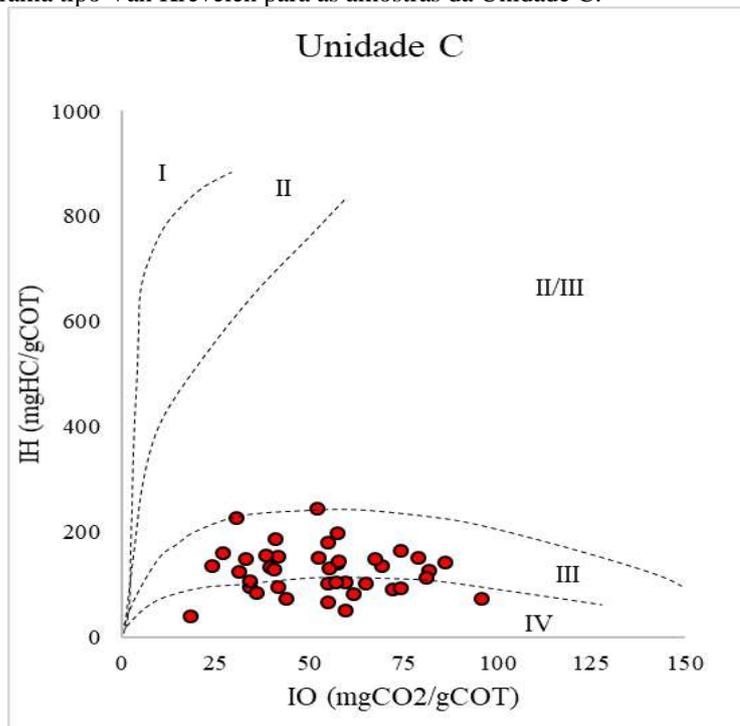
A seção está localizada de 302,00 m a 323,60 m na Fm. Itaim e é constituída, da base para o topo, por: arenito avermelhado e intensamente bioturbado; estratos mais sílticos, contendo interlaminação com arenito muito fino, fraco a moderadamente bioturbado, intercalados por estratos arenosos, com estratificação de baixo ângulo, também interlaminados com siltito laminado.

São ao todo 42 amostras pertencentes à essa unidade cujos teores de COT aumentam na base (1,01% a 1,29%) e são, majoritariamente, baixos (0,28% a 0,99%) no topo. Apesar do aumento, ainda podem ser considerados relativamente baixos teores. Os valores de enxofre permearam de 0,01% a 0,72%, significando assim, que a deposição de toda essa zona ocorreu, provavelmente, em um ambiente óxico, com exceção de um breve momento redutor em 317,20 m de profundidade cujo teor alcançou 1,73%. Já o RI é, predominantemente, alto (80 a 97%), sendo que, apenas três amostras parecem ser formadas, parcialmente, por carbonatos, tais como: 304,60 m; 305,50 m; 312,85 m; e 321,50 m.

Para a análise de pirólise, foram encaminhadas 40 amostras pertencentes a intervalos de maior interesse, onde havia maior proporção de silte aparentemente na composição. O tipo de querogênio presente é do tipo III e tipo IV, sendo a primeira, proveniente de vegetais superiores com teores de hidrogênio baixos e rico em oxigênio, propício a geração de gás, enquanto que o segundo, é referente a matéria orgânica oxidada, sem qualquer potencial para geração de hidrocarbonetos (**Figura 34**).

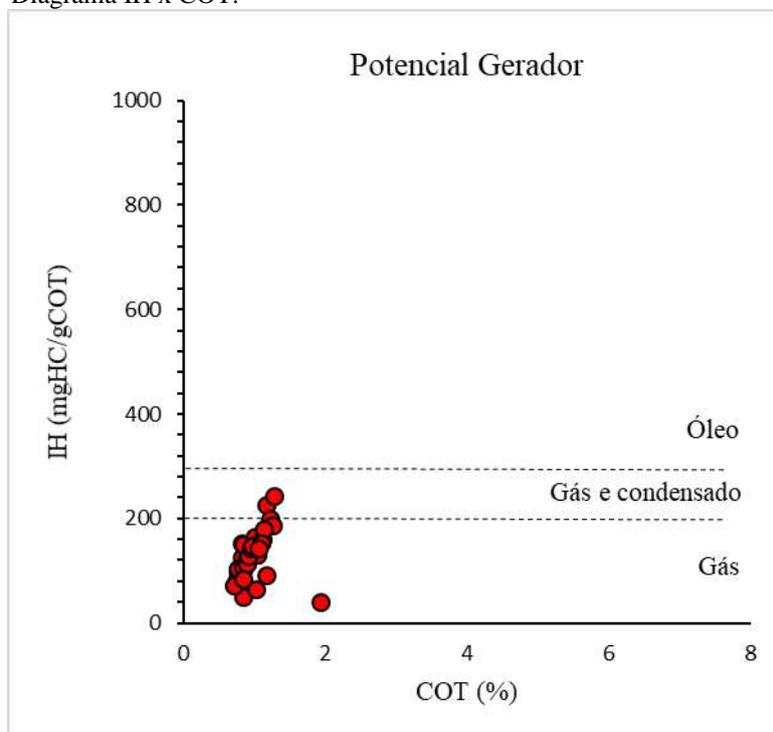
Apenas cinco amostras apresentaram moderado potencial para geração de hidrocarbonetos, 2,03 a 3,15 mgHC/gRocha (314,70 m; 318,20 m; 318,70 m; 319,20 m; 320,20 m), e o restante, baixo potencial (< 2,00 mgHC/gRocha). Os hidrocarbonetos já gerados nesse bloco corresponde, prevalentemente, por gás (50,00 a 187,40 mgHC/gCOT, com exceção de duas amostras espaçadas que permearam em 227,12 e 244,19 mgHC/gCOT). Além disso, nenhuma atingiu o estágio de maturidade térmica ($T_{\text{máx}} < 440^{\circ}\text{C}$) (**Figuras 35 e 36**).

Figura 34 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade C.



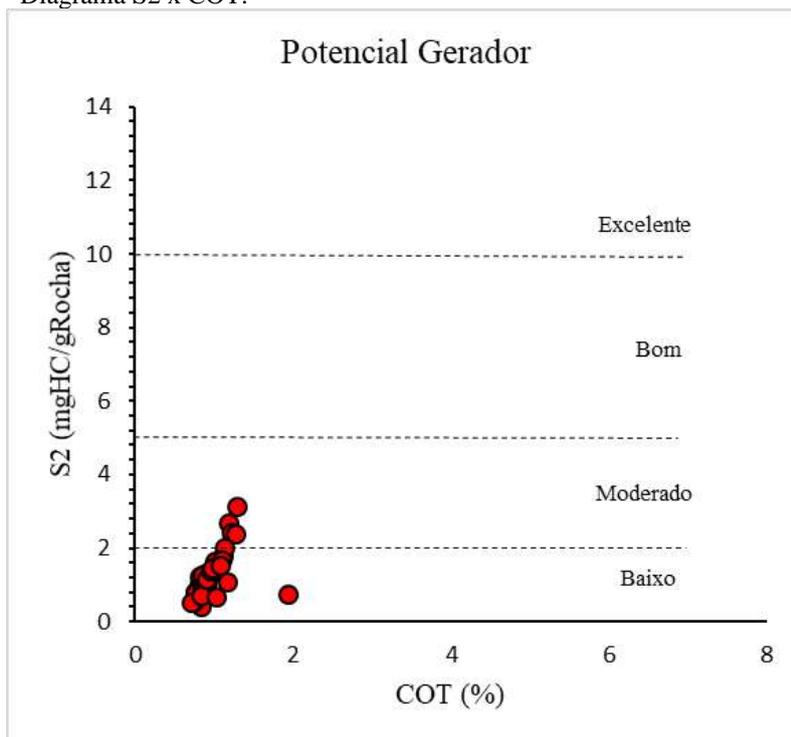
Fonte: A autora, 2021.

Figura 35 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 36 - Diagrama S2 x COT.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.4.4. Unidade D

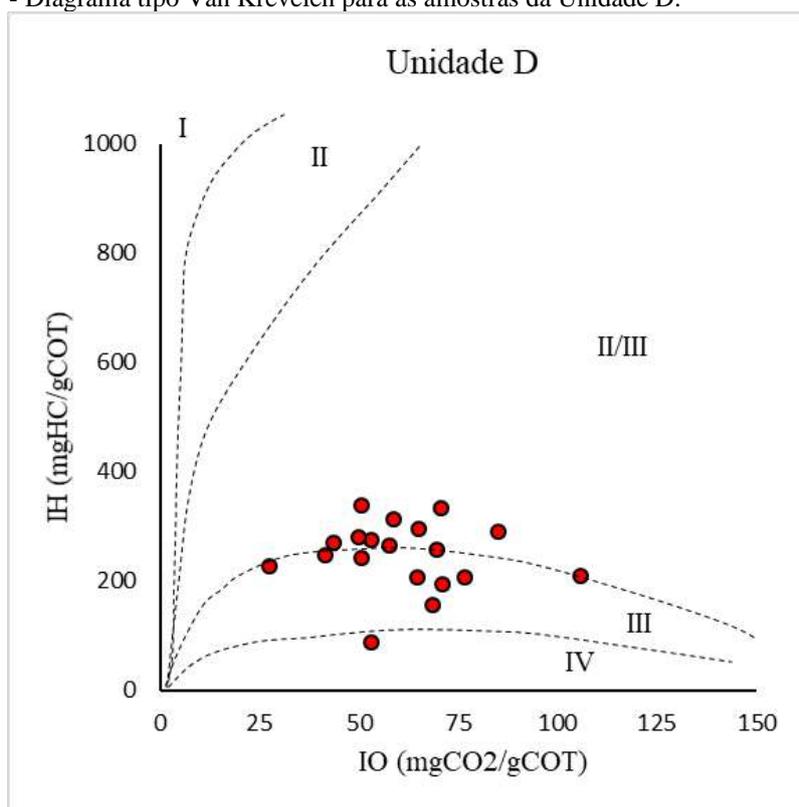
Essa seção corresponde as rochas encontradas de 277,95 m a 302,00 m de profundidade na Fm. Itaim. É constituída pelas seguintes litologias, da base para o topo: interlaminação de siltito laminado com arenito muito fino, com bioturbação fraca a moderada, geralmente, apresentando WCL e HCS, intercalando com porções mais arenosas de arenito muito fino, intensamente bioturbado a mosqueado com siltito, também, por vezes, laminado.

Ao todo, são 48 amostras pertencentes a essa unidade, sendo que todas foram para a análise de COT e, 19 amostras foram escolhidas, devido a pontos de maior interesse, e encaminhadas para a análise de pirólise.

O teor de COT dessas amostras varia de 0,26% a 0,70%, sendo considerado baixo, não propenso para a geração de hidrocarbonetos. Já a os teores de S obtidos variam entre 0,02% a 0,15%, caracterizando um ambiente deposicional de natureza óxica. O resultado do RI indica que são rochas, predominantemente, siliciclásticas (88% a 99%).

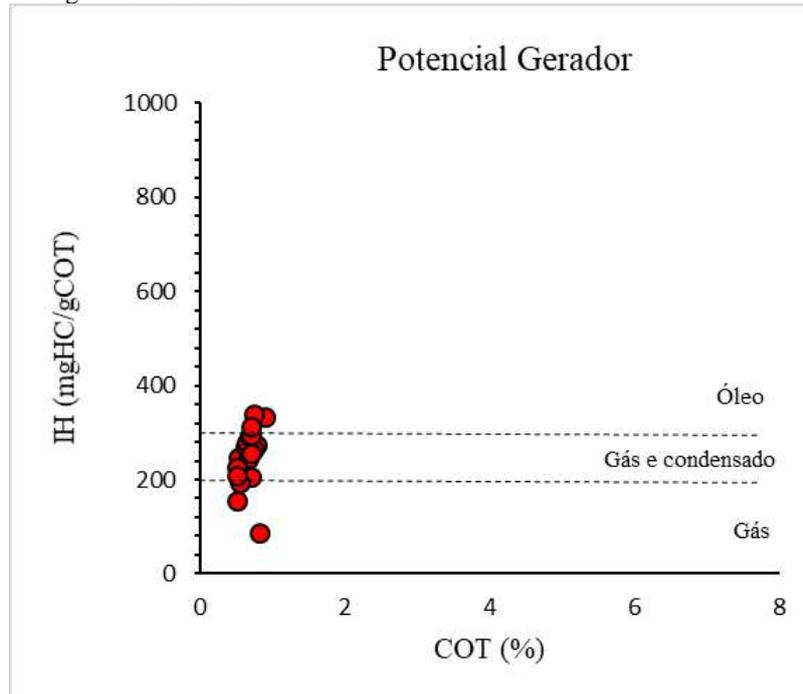
Das 19 amostras, três apresentam potencial para geração de gás (IH variando de 86,42 a 194,55 mgHC/gCOT) e as demais, gás e condensado (IH 205,80 a 308,36 mgHC/gCOT). Essa unidade, também, tem baixo potencial para geração, uma vez que, os teores de S2 permeiam entre 0,70 e 2,97 mgHC/gRocha. O tipo de querogênio associado é, sobretudo, o tipo II/III, ocorrendo, também, casos do tipo III e, subordinadamente, tipo IV. Isso é constatado pelo fato de boa parte das amostras terem quantidade considerável de hidrogênio em sua composição, mas devido ao valor significativo de oxigênio presente, ainda são insuficientes para gerar grandes volumes de hidrocarbonetos. A matéria orgânica associada se trata de origem terrestre, sobretudo, podendo ter, também, contribuição marinha (**Figura 37**). Nenhuma das amostras atingiu a temperatura mínima para obter maturidade térmica, são ditas imaturas (**Figura 38 e 39**).

Figura 37 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade D.



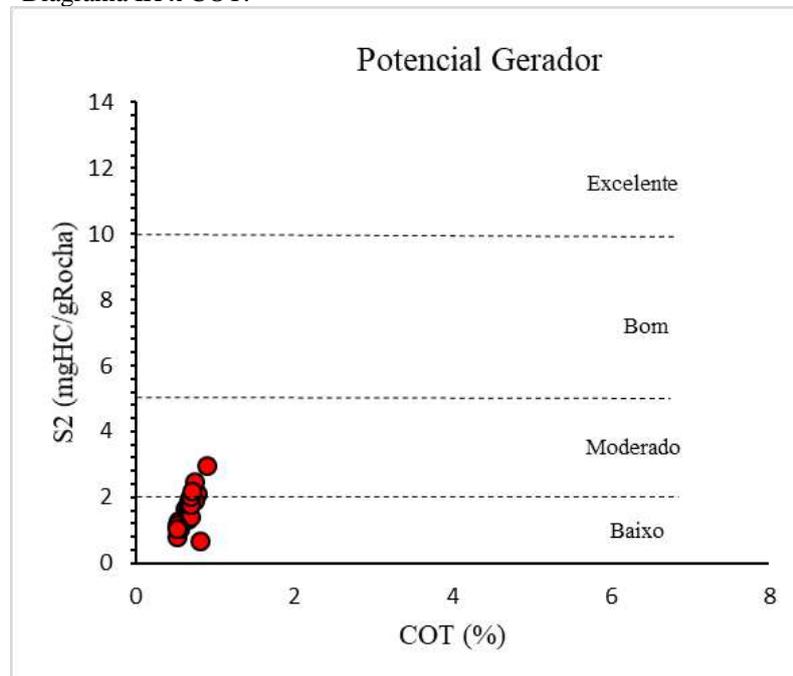
Fonte: A autora, 2021.

Figura 38 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 39 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

4.3.4.5. Unidade E

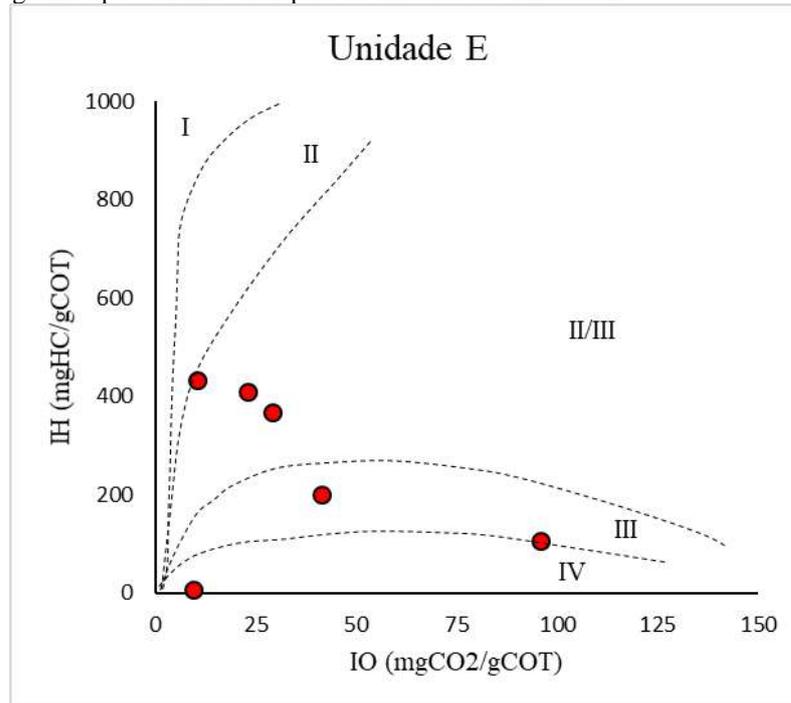
Esse bloco é composto por amostras de 246,60 m a 277,95 m de profundidade cujo as características litológicas, da base para o topo, são: alternância de arenitos finos e brancos exibindo estratificação plano paralela, truncamentos de baixo ângulo e estratificação cruzada *hummocky*, ora fortemente bioturbados; sendo intercalados por interlaminações, menos espessos, de arenito muito fino, em maior proporção, intensamente bioturbado, por vezes, apresentando *hummocky*, com siltito laminado.

São 23 amostras correspondentes a essa faixa, sendo que apenas, 6 amostras foram submetidas a pirólise, respeitando os pontos de maior interesse nessa seção.

A quantidade de COT encontrada nessas rochas varia de 0,13 a 1,82%, haja vista, a maior parte das amostras não foi ultrapassado 1%. Os valores de S permearam em 0,10% a 0,69% que indica ambiente sedimentar óxico. Enquanto que o resultado do RI corrobora para que, grande parte, sejam rochas siliciclásticas (RI > 84%), com exceção da amostra 276,40 m cujo teor de 58% indica composição, parcialmente, carbonática.

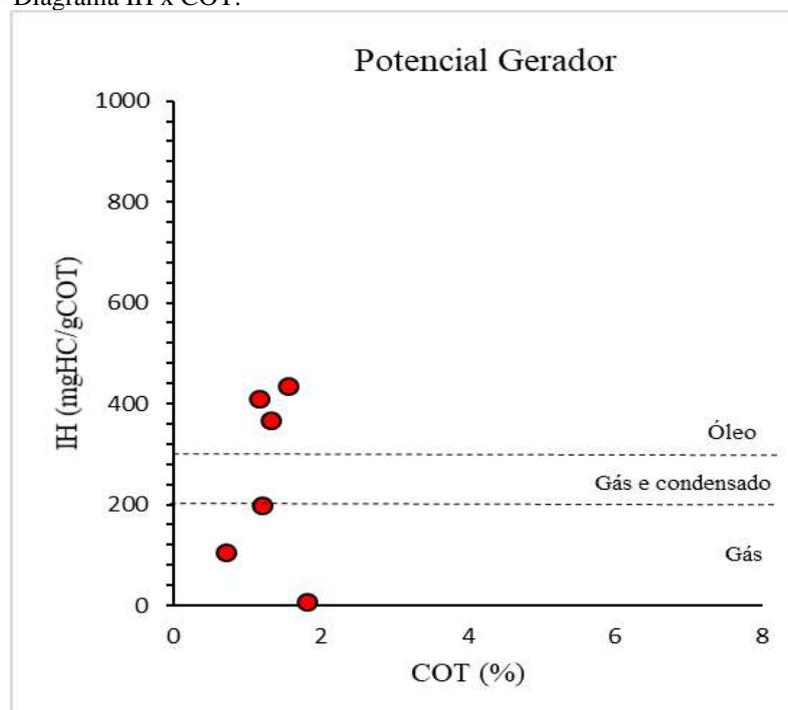
Os hidrocarbonetos gerados são compostos por gás e condensado (IH variando de 6,59 a 434,19 de mgHC/gCOT), tendo cinco amostras com resultado de S2 menor do que 2 mgHC/gRocha e outras quatro amostras, apresentando S2 variando de 2,42 a 6,73 mgHC/gRocha. O tipo de querogênio associado é, majoritariamente, do tipo II/III, tendo também tipo III e tipo IV. As amostras possuem, relativamente, uma quantidade alta de hidrogênio em sua composição, provavelmente, proveniente de origem marinha, podendo formar consideráveis volumes de hidrocarbonetos. Os dois últimos tipos remetem a um material empobrecido em hidrogênio e rico em oxigênio, podendo o penúltimo gerar gás, e sendo de origem terrestre. Enquanto que a matéria orgânica do tipo IV é oxidada, sem quaisquer potencial (**Figura 40**). Tais dados indicam, nessas rochas, um potencial moderado a bom para geração de hidrocarbonetos. Embora, a T_{máx} das amostras tenha diagnosticado todas como imaturas termicamente (**Figuras 41 e 42**). No entanto, deve ser ressaltado que os resultados mais favoráveis para ageração de hidrocarbonetos nesta unidade foram obtidos a partir de amostras de siltitos intercalados em uma seção predominantemente arenosa, o que diminui sensivelmente o interesse econômico deste intervalo para fins de geração de HCs.

Figura 40 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade E.



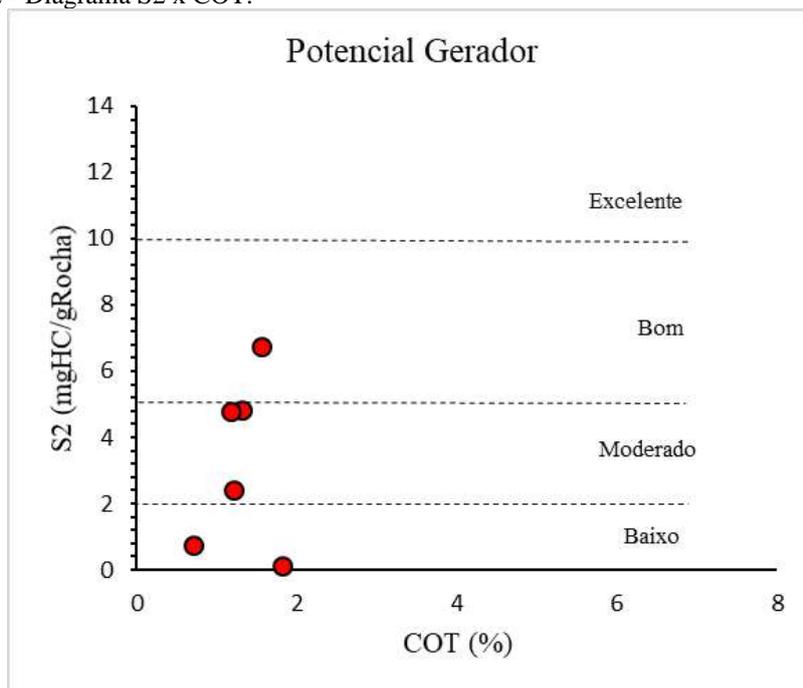
Fonte: A autora, 2021.

Figura 41- Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 42 - Diagrama S2 x COT.



Fonte: A autora, 2021

4.3.4.6 Unidade F

Essa unidade abrange amostras de 222,40 m a 246,60 m de profundidade na Fm. Itaim. Tais rochas incluem: na base, arenito fino, branco a cinza, com HCS e estratificação plano paralela; sendo intercalado por arenito fino, branco a cinza, e intensamente bioturbado; gradando para interlaminação de arenito muito fino com siltito laminar; e ao topo, há a presença de siltito laminar, em maior proporção, intercalando com arenito muito fino, com HCS e moderadamente bioturbado.

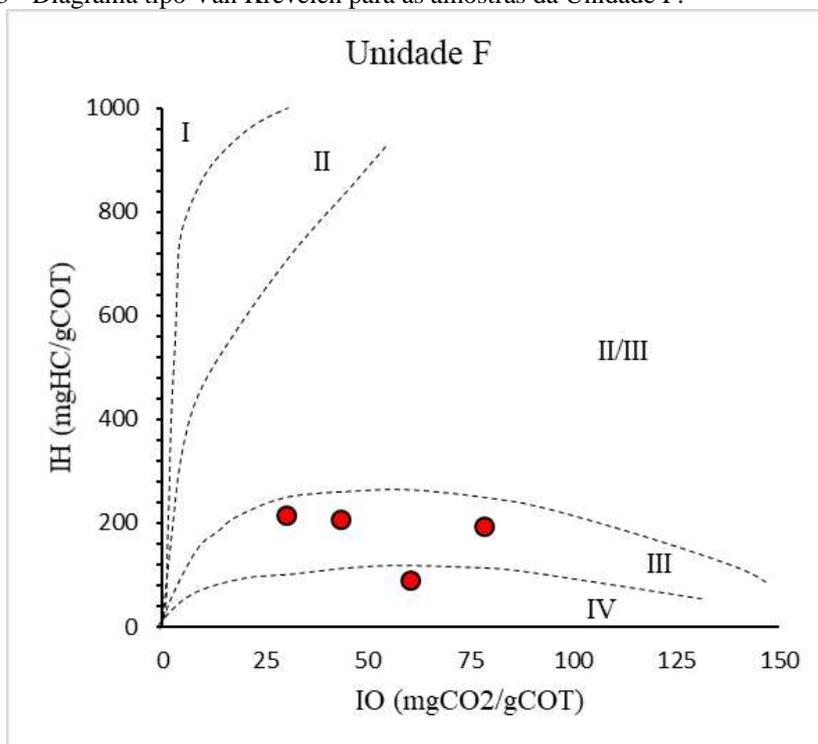
São 14 amostras nessa seção, sendo que apenas quatro foram enviadas para a análise de pirólise, respeitando a escolha por intervalos de maior interesse.

Os teores de COT foram baixo, variando de 0,19% a 0,95%. Enquanto que os valores de S permearam em 0,06% a 0,69%, com exceção de duas amostras (222,75 m e 226,70 m) que possuem 1,47% e 1,11% de S, respectivamente, e sugerem breves momentos anóxicos em um ambiente predominado por condições paleoambientais oxidantes. O resultado do RI indica que, grande parte, das amostras sejam rochas siliciclásticas (RI > 86%), salvo a amostra 245,90 m que por conter, possivelmente, carbonato em sua composição, apresentou o teor de 43%.

O tipo de querogênio associado é do tipo III e, secundariamente, do tipo IV. Isso porque são materiais ricos em oxigênio e empobrecido em hidrogênio, o que remete a propensão para geração de gás (**Figura 43**).

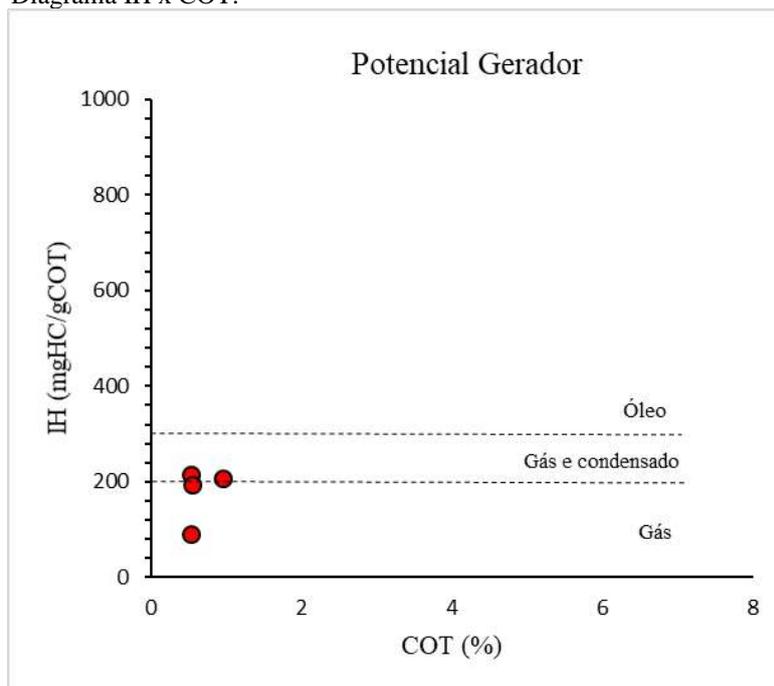
Os valores de S2 nessas amostras variaram de 0,48 a 1,97 mgHC/gRocha, evidenciando ter baixo potencial. Já o IH permeiou entre 90,57 a 215,09 mgHC/gCOT, o que sugere que esses hidrocarbonetos encontrados sejam gás. O T_{máx} dessas rochas reafirmou que a ideia de que essas não tenham atingido a maturidade térmica ideal (**Figuras 44 e 45**).

Figura 43 - Diagrama tipo Van Krevelen para as amostras da Unidade F.



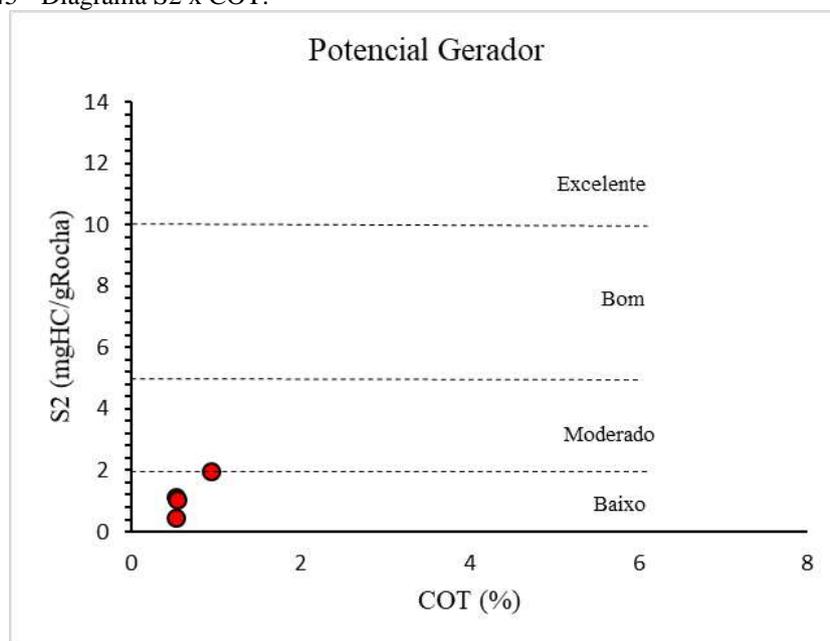
Fonte: A autora, 2021.

Figura 44 - Diagrama IH x COT.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 45 - Diagrama S2 x COT.



Fonte: A autora, 2021

4.4 Ambiente Depositional

Para a realização da análise paleoambiental das amostras, com ênfase na Fm. Pimenteiras, se optou pela utilização dos dados apenas do poço GASBRAS-2-RS-TO, uma vez que é o único poço que, até o momento desta publicação, havia todos dados sedimentológicos e geoquímicos disponíveis.

4.4.1 Fm. Jaicós e Fm. Itaim

Com base nos dados faciológicos e geoquímicos foi possível caracterizar o paleoambiente deposicional da Fm. Itaim e do topo da Fm. Jaicós como uma plataforma marinha rasa, submetida a ação predominante de ondas normais e de tempestade.

A seção de topo da Fm. Jaicós compreende, da base para o topo, arenito gradando de médio a grosso para fino a muito fino, tendo boa seleção dos grãos, sendo o limite da formação, marcado pela presença de conglomerados. Segundo, Della Fávera (2001), no contexto de plataformas marinho-rasas, dominadas pela ação de ondas, em ambientes localizados entre NBON e NBOT, ocorrem ações de retrabalhamento por ondas de tempestade, como a gradação de grãos e presença de HCS em arenitos. O conglomerado descrito é de origem marinha, provavelmente, depositado na parte transicional a partir de canais fluviais de alta energia sugerindo uma contribuição deltaica.

Na Fm. Itaim se observa variação de ciclos de arenito muito fino a fino, em direção ao topo, que aumentam tanto em questão de granulometria (granocrescência ascendente), como também, no que diz respeito a espessura (estratocrescência). Esses ciclos são bem marcados, contendo bioturbação moderada, e nos quais há predomínio de estratos de arenitos com HCS mais ao topo. Essas sucessões verticais que começam com granocrescência e se encerram, geralmente, com um *hardground*, sobre a última camada, com *hummocky* e muita bioturbação, confere a fácies de lobo de tempestite. Onde a combinação de fluxos unidirecionais e oscilatórios podem findar na construção dessa estrutura sedimentar marcante (Della Fávera, 2001). A Formação teria sido depositada entre a antepraia (*foreshore*) e a face de praia (*shoreface*), onde processos trativos, dominado por correntes e ondas, teriam influenciado o retrabalhamento dos sedimentos, além do aporte sedimentar advindo de prováveis deltas.

4.4.2 Fm. Pimenteiras

A deposição da Formação Pimenteiras é reconhecida na literatura como tendo se processado em ambiente deposicional marinho plataformar sob ação dominante de ondas de tempestade (Caputo, 1984; Della Fávera, 1990; Vaz et al., 2007).

A análise em contexto das sete fácies que predominam na Formação Pimenteiras, quais sejam: F1, F2, AH1, AH2, AH3, A1 e A2, aliada aos dados geoquímicos, corrobora o modelo de deposição dessas fácies constiuintes na área de estudo dentro do cenário de ambiente marinho raso submetido a ação de ondas normais e de tempestade, em diferentes zonas da plataforma, conforme representado no modelo deposicional esquemático apresentado na **Figura 46**.

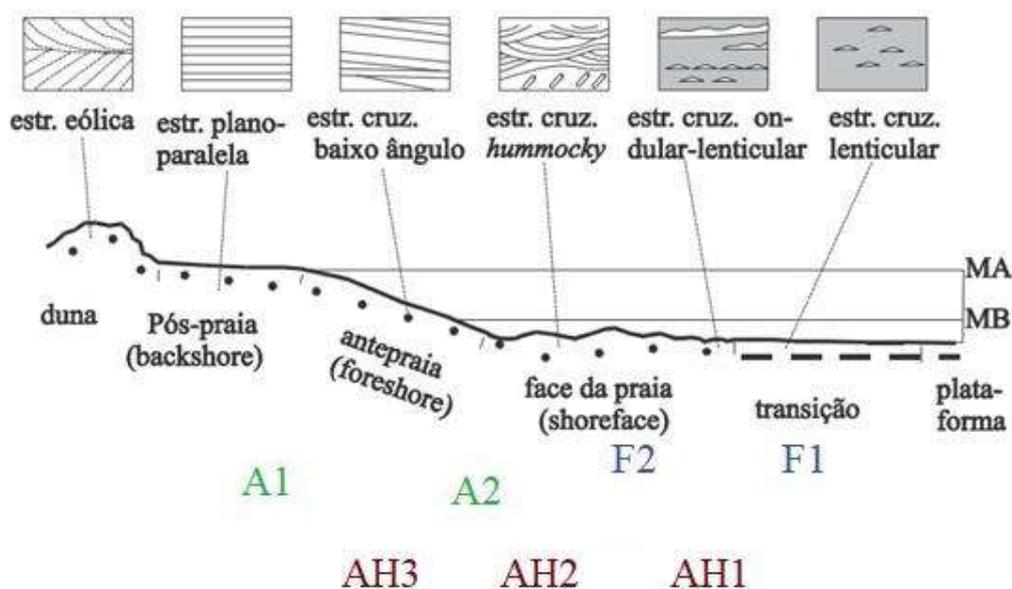
Na parte transicional, estão os folhelhos laminados, com pouca ou nenhuma bioturbação, e que foram depositados em ambientes distais da plataforma, lugar abaixo da zona de retrabalhamento por ondas de tempestade, em zonas mais profundas nas quais condições redutoras dominam e se tem melhor preservação da matéria orgânica (fácies F1). Nesse local, haveria a formação dos folhelhos radioativos mais importantes da Bacia. Um pouco acima na fisiografia dessa plataforma, foram depositados folhelhos finamente intercalados com arenitos muito fino, abaixo do nível de ondas de tempestade, em um sistema menos redutor, podendo ter moderada bioturbação, até mesmo devido a pouca entrada de oxigênio no sistema permitindo a sobrevivência de organismos (Fácies F2 e AH1 e AH2).

As fácies predominantemente arenosas (AH3, A1 e A2) estariam se depositando entre a pós-praia e a face da praia. Nessas duas zonas, mudanças no fluxo, ações de ondas e bioturbação foram essenciais para gerar distintos padrões de estratificações. No primeiro sistema, acima das ondas normais, há a preservação de estruturas, além ser característico de acamamento plano-paralelo e truncamentos de baixo ângulo. A medida que se caminha para a rampa, o fluxo vai aumentando, se está próximo a zona de ondas de tempestade, há retrabalhamento dos sedimentos devido ação de ondas e fluxos combinados de tempestade, o que pode culminar na construção de HCS (tempestitos). Adicionalmente, como são regiões próximos ao continente, constitui o depósito de alta energia, concentrando fração areia.

As intercalações Silte/Areia estão associadas a decantação granocrescentes que ocorrem na plataforma, na qual quanto mais próximo do continente, maior seria a

porcentagem de arenito na camada. Zonas próximas a *foreshore* estariam interligadas com a ação de ondas normais e com um fluxo de bioturbação maior, capaz de retrabalhar o material, não preservando estratificações. Já quando ocorre próximo ao ambiente transicional, abaixo do NBOT, não há energia para desorganizar o material, o mesmo consegue ser preservado e melhor selecionado.

Figura 46 - Modelo deposicional para Fm. Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO.



Nota: Modelo deposicional costeiro a marinho raso dominado pela ação de ondas normais e de tempestade, advogado para a deposição da Formação Pimenteiras na área de estudo (sendo também aplicável para a Formação Itaim), com a indicação das fácies definidas neste estudo dentro do desenho esquemático do sistema deposicional de marinho-raso.

Fonte: A autora, 2021.

4.4.2.1 Relação COT x S nos Folhelhos A, B e C

Com base no resultado de análises geoquímicas, foi possível realizar um gráfico COT x S (**Figura 47**) com a finalidade de diferenciar as condições paleoambientais de reinantes na deposição de cada um dos folhelhos reconhecidos (A,B e C), ressaltando

características e a mudança, no geral, de disaeróbico para anaeróbico no sistema deposicional.

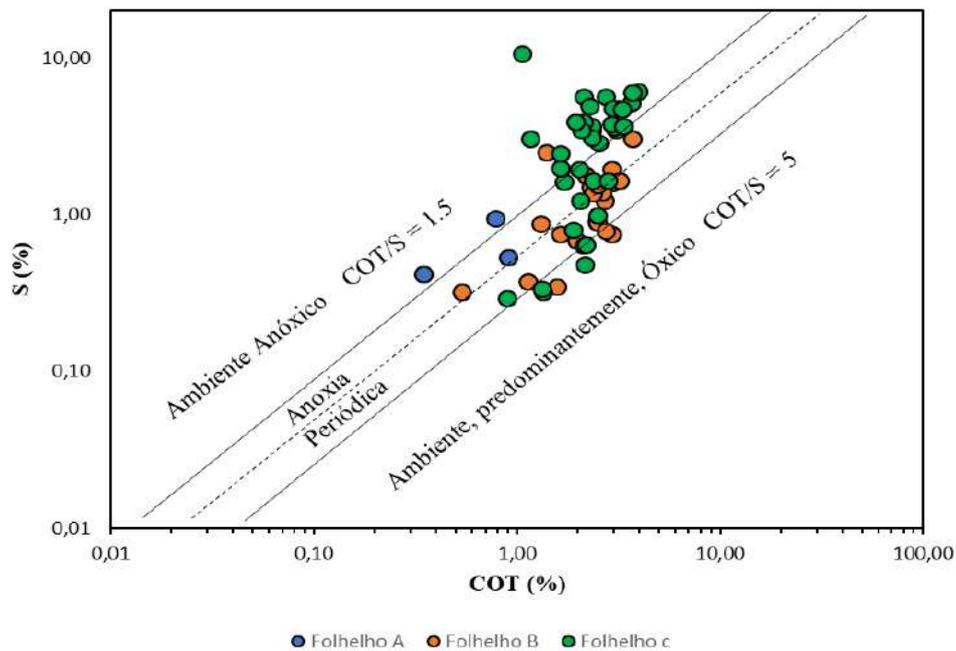
O Folhelho A, ocorrente na base da formação é o que possui teores baixos e equiparáveis tanto de COT quanto de S. Está inserido em um quadro, predominantemente, transicional com anoxia periódica, ou seja, no momento da deposição havia restrita circulação de água e pouca entrada de oxigênio no sistema.

No entanto, os folhelhos B e C, por terem maiores espessuras e, conseqüentemente, maior amostragem, marcam a passagem de um ambiente, predominantemente, óxico para anóxico. Essa passagem é ressaltada quando se utiliza somente as subunidades inferiores dos folhelhos B e C, organicamente mais ricas em COT, e as três amostras pertencentes ao folhelho A (**Figura 48**).

O Folhelho B contém bons teores de COT (1,1% a 3,7%) e evidencia o aumento na concentração de enxofre no sistema, só que ainda mostra oscilação nesses teores – ou seja, momentos de menor concentração (0,38% a 0,90% de S) intervalando com períodos redutores (1,23% a 3,05% de S).

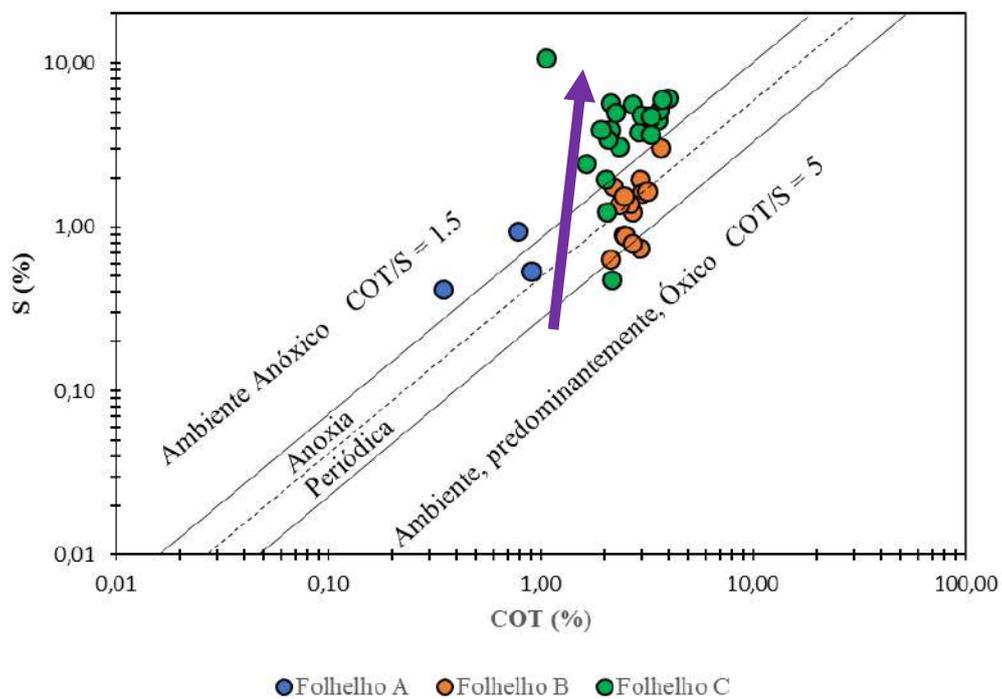
Já o folhelho C se destaca por conter maior concentração de COT (1,93% a 3,95%) concomitantemente com altas percentagens de enxofre no sistema (3,12% a 10,70%), na base, caracterizando um ambiente anóxico. A medida que se caminha em direção ao topo, o ambiente vai recebendo entrada de oxigênio e, a partir de 65,0 m, há diminuição dos valores de enxofre (< 3,00%) concordante com a discreta redução de COT (1,3% a 3,0%).

Figura 47 - Relação COT x S dos folhelhos encontrados no poço GASBRAS-2-RS-TO.



Fonte: Modificado de Berner (1983); Fleurence et al. (2013).

Figura 48 - Relação COT x S do folhelho A com as subunidades dos folhelhos B e C no poço GASBRAS-2-RS-TO. A seta roxa evidencia o aumento da taxa de anoxia do folhelho A até o C.



Fonte: Modificado de Berner (1983); Fleurence et al. (2013).

4.5 Análise Estratigráfica

A **Figura 49** apresenta o perfil de integração de dados e interpretações faciológicas, geoquímicas e estratigráficas das Formações Itaim e Pimenteiras no poço GASBRAS-2-RS-TO.

No âmbito da Fm. Itaim, com base na integração desses dados, são reconhecidos três ciclos deposicionais progradantes (sequências de 3ª ordem?), denominados **ITA-1**, **ITA-2** e **ITA-3**, a partir da base, similares às sequências genéticas de Galloway (1989), com espessuras médias de cerca de 40 m. Cada ciclo é limitado na base por superfície de afogamento marinho/ Superfície Transgressiva (ST) e é definido na base por intervalo de anomalias de COT nas fácies pelíticas (F1 e F2), que contemplam as superfícies de inundação máxima (SIM) de cada ciclo, e que é, então, sucedido pela seção progradante que predomina em cada ciclo. Esta seção progradante é evidenciada pela tendência de diminuição dos teores de COT em direção ao topo dos ciclos e pelo aumento da proporção de fácies arenosas proximais na mesma direção. As setas menores (em azul) da **Figura 49** indicam as tendências progradantes de cada ciclo, marcando o preenchimento progressivo do espaço de acomodação em cada ciclo com a tendência progressiva de raseamento do sistema em direção ao topo.

Considerando-se o conjunto dos três ciclos **ITA-1**, **ITA-2** e **ITA-3**, reconhecidos na Fm. Itaim, se observa uma tendência geral progradante na unidade, destacada pela seta vermelha na **Figura 49**. Esta tendência geral progradacional na Fm. Itaim é bastante evidenciada quando se nota a tendência geral de diminuição dos teores desde a base até o topo da Fm. Itaim.

No contexto da Fm. Pimenteiras, por sua vez, são também identificados três ciclos deposicionais progradantes (sequências de 3ª ordem?), com espessuras variando entre 60 e 70 m, semelhantes aos ciclos definidos na Fm. Itaim, que foram então denominados de **PMT-1**, **PMT-2** e **PMT-3**, a partir da base (**Figura 49**), igualmente similares à sequências genéticas de Galloway (1989). Tais ciclos são, igualmente, limitados na base por superfície de afogamento marinho/ superfície transgressiva (ST) e definidos na base pelos intervalos de anomalias de COT nas fácies pelíticas (F1 e F2), que contemplam as superfícies de inundação máxima (SIM) de cada ciclo, e que são, então, sucedidos pela seção progradante predominante em cada ciclo.

No entanto, quando se considera em conjunto os ciclos **PMT-1**, **PMT-2** e **PMT-3**, reconhecidos na Fm. Pimenteiras, observa-se uma tendência geral retrogradante desde a base em direção ao topo da Fm. Pimenteiras (tendência destacada com a seta vermelha

na **Figura 49**). Esta tendência retrogradante geral é melhor evidenciada pelo maior enriquecimento orgânico dos três intervalos de anomalias do COT (folhelhos A, B e C), e pelo aumento do caráter de anoxia em direção ao topo durante a deposição desses intervalos, conforme assinalado no **item 4.3.1.1**.

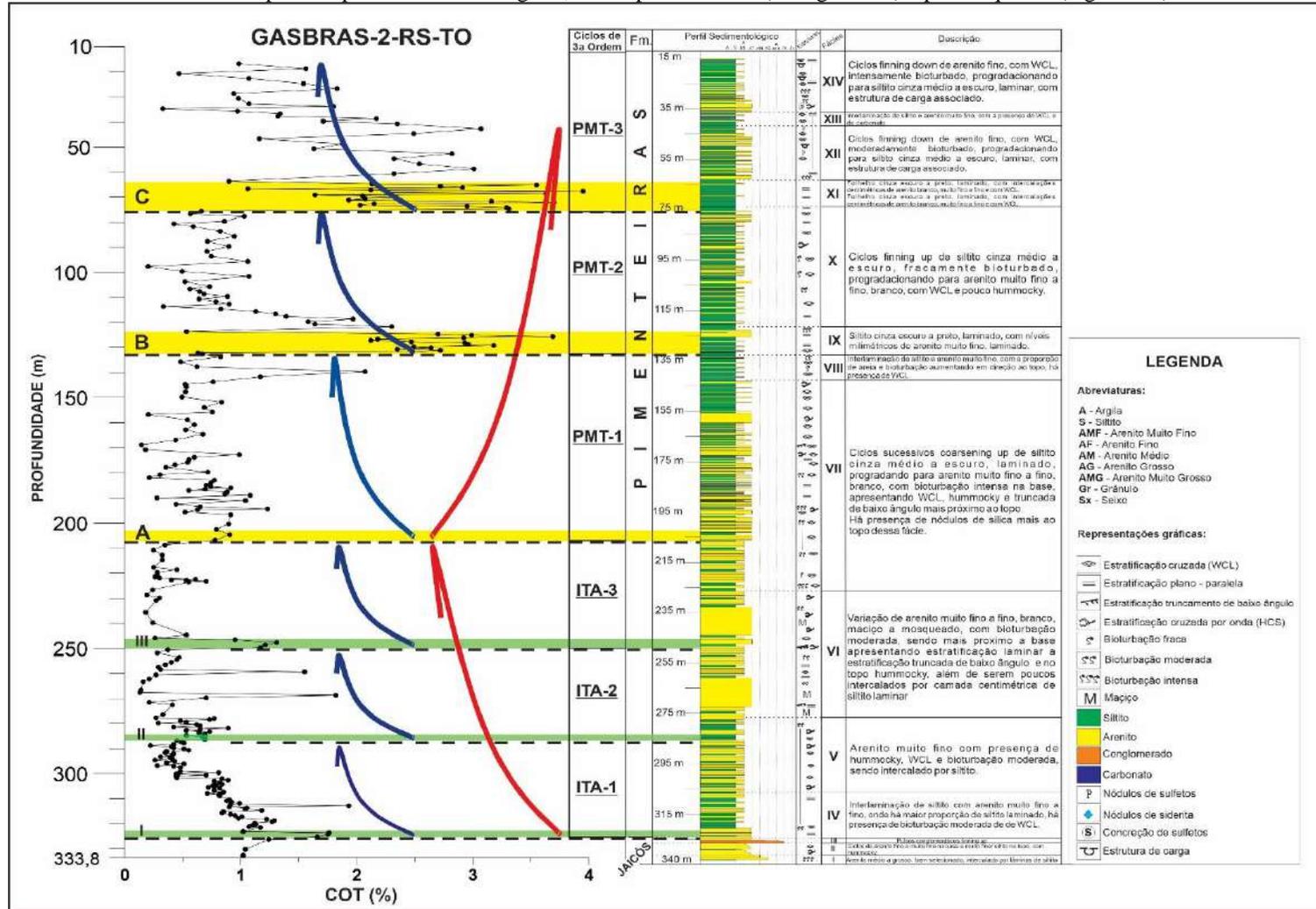
Essa repetição de de ciclos progradacionais, conferida nesse trabalho, culminando com uma importante inundação da plataforma (SIM), é comum em bacias marinhas, de acordo com Galloway (1989).

Nos poço estudados, em função da testemunhagem contínua e da grande densidade de dados de COT no âmbito das Formações Itaim e Pimenteiras, os resultados da geoquímica permitiram a identificação, delimitação em alta resolução e rastreamento das SIMs de 3ª ordem dessa seção, em caráter ainda inédito para a borda sudoeste da Bacia do Parnaíba.

Ciclos de mais alta frequência, com espessuras variando de 19 m a 11 m, em geral de caráter progradante, são também identificáveis na seção. Nas fichas de descrição dos testemunhos, apresentadas nos **Apêndices Y, Z e AA** (demarcados por pontilhados vermelhos), tais padrões podem ser reconhecidos.

A superfície de contato entre as Formações Itaim e Pimenteiras é marcada como uma superfície de descontinuidade de maior magnitude, marcando a inflexão entre a tendência geral progradante da Fm. Itaim para uma tendência geral retrogradante da Fm. Pimenteiras. Tal superfície é assinalada como uma Superfície Transgressiva (ST) em escala maior. Outro ponto importante a ser destacado, é que a Superfície de Inundação Máxima (SIM) associada ao folhelho C, que constitui, segundo Rodrigues (1995), no principal gerador do Devoniano da Bacia, é associada a um evento anóxico global, de idade frasniana, por Rodrigues et al. (1995) e por Steemans et al. (2021).

Figura 49 - Desenho esquemático contendo sistemas deposicionais atuantes. As setas menores (em azul) destacam o movimento em períodos curtos; já as setas maiores apontam para o movimento geral, sendo para a direita (transgressivo) e para esquerda (regressivo).



Fonte: A autora, 2021.

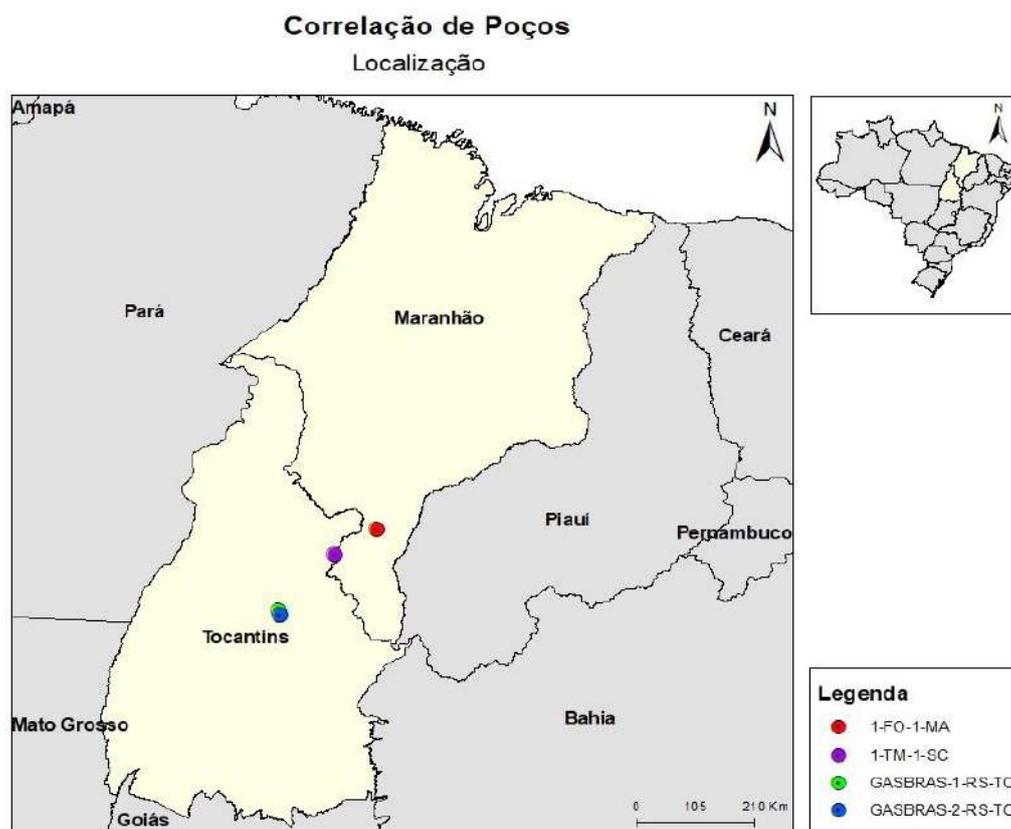
4.6 Correlação com Poços Adjacentes

Dois poços exploratórios (1-TM-1-MA e 1-FO-1-MA), posicionados relativamente próximos ao GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO (**Figura 50**), foram utilizados para a correlação dos Folhelhos A, B e C existentes na Formação Pimenteiras (**Figura 51**).

Para inferir a correlação geológica entre os poços foram utilizados como parâmetros a análise faciológica dos poços supracitados nessa pesquisa e a perfilagem dos poços 1-FO-1-MA e 1-TM-1-MA, especificamente, os dados demonstrados em curvas, tais como: densidade (vermelho) e neutrão (azul). Os folhelhos foram marcados em zonas onde essas curvas exibiam abruptas separações, nesse último caso.

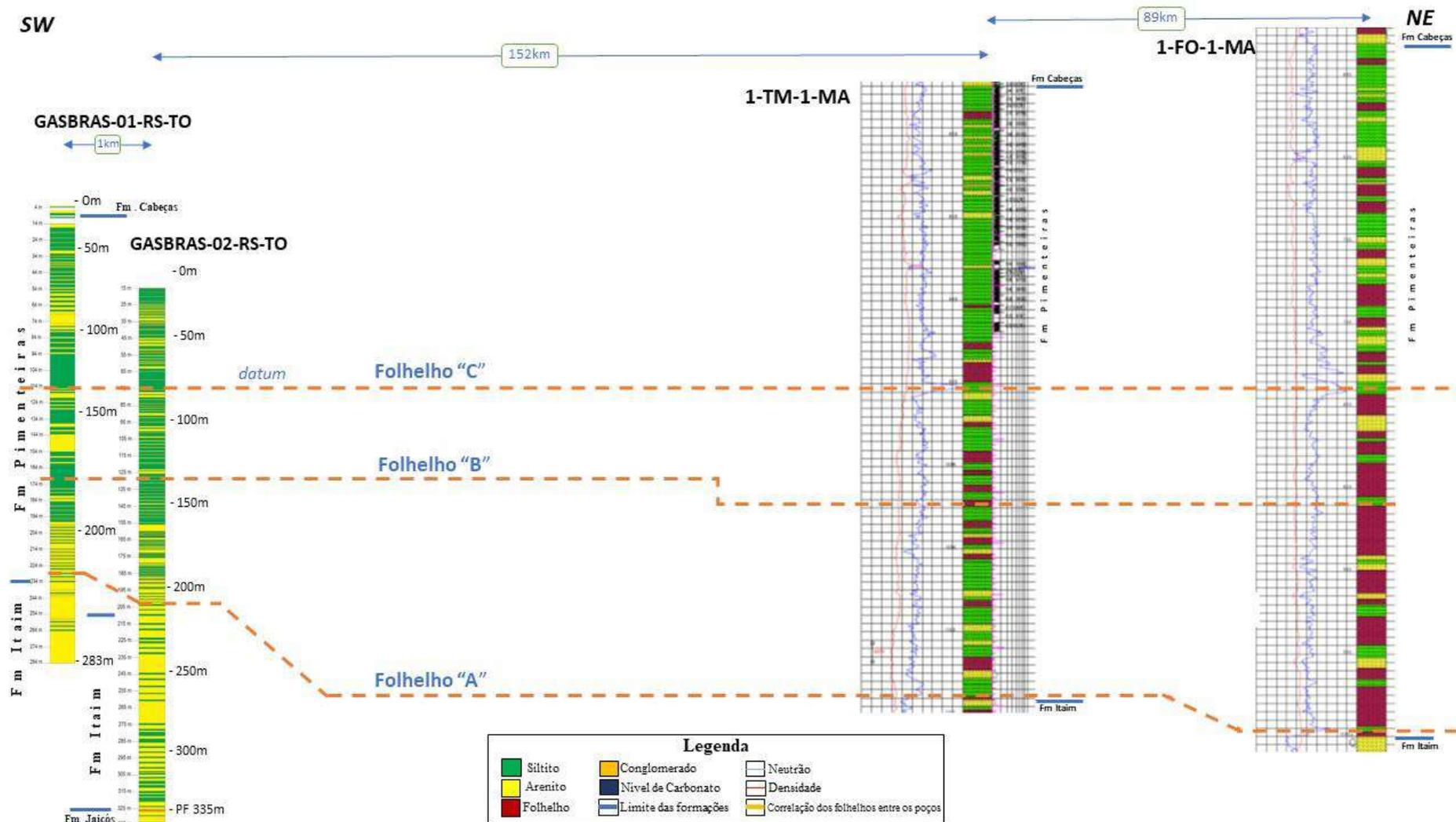
Tal correlação foi elaborada na tentativa de demonstrar graficamente a continuidade lateral dos folhelhos geradores outrora supracitados, a partir de dados já conhecidos na literatura.

Figura 50 - Ilustração com a localização dos poços utilizados na correlação geológica.



Fonte: A autora, 2021.

Figura 51 - Correlação dos Folhelhos A, B e C com poços adjacentes aos objetos de estudo.



Fonte: A autora, 2021.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nas variações litológicas, foi possível realizar a identificação de 12 fácies sedimentares nos dois poços: GASBRAS-1-RS-TO e GASBRAS-2-RS-TO.

No primeiro poço, para identificar os folhelhos geradores, se utilizou, sobretudo, a correlação de litotipos com o poço adjacente. É importante ressaltar que, como o poço GASBRAS-1-RS-TO foi perfurado cerca de 50 metros acima do GASBRAS-2-RS-TO, esse poço compreende a Fm. Pimenteiras e Fm. Itaim. Para realizar a demarcação acurada dos folhelhos radioativos da primeira formação nos testemunhos de sondagem, será necessário os dados geoquímicos restantes, os quais, em trabalhos futuros, poderão ser utilizados.

Em contrapartida, os dados gerados a partir das análises no segundo poço, possibilitaram a realização da estratigrafia química e integração de dados geoquímicos e sedimentológicos, como: COT e pirólise, além ser possível delimitar limites das Formações presentes (Jaicós, Itaim e Pimenteiras) a partir de feições sedimentológicas.

As fácies encontradas compreenderam, primordialmente, tempestitos na Fm. Jaicós, ciclos granocrescentes na Fm. Itaim e ciclos progradacionais culminando em SIM na Fm. Pimenteiras.

A Fm. Itaim é característica de trato de sistema de mar alto, uma vez que, é formado por sequências progradantes com presença de aporte deltaíco. Há presença de finas camadas de folhelhos depositados, em isoladas condições redutoras, com bons teores de COT. Contudo, como a Formação é, essencialmente, arenosa, não há perspectiva de ter havido geração de grande volumes de hidrocarbonetos, não se tornando assim, atrativa para a exploração. Adicionalmente, os valores de $T_{máx}$ obtidos pela pirólise não ultrapassam $440^{\circ}C$, não atingindo assim, a janela de maturação térmica na área de estudo.

A Fm. Pimenteiras apresenta, nesse poço, uma tendência pertencente ao regime de trato de sistema transgressivo. Isso porque se nota uma variação granulométrica de arenitos progradacionando para siltitos, por vezes, bioturbados e com estratificação WCL. Adicionalmente, foram encontradas 3 superfícies de inundação máxima (SIM) nessa formação, sendo, a primeira, folhelho A, de 203,5 m a 209,9 m. Após isso, ocorrem outros dois períodos com ciclos progradantes iniciados em outras SIMs, a saber: em 115,0 m a 132,0 m (Folhelho B); e em, 36,5 m a 74,6 m (Folhelho C).

Essa última formação é reconhecida na literatura como uma Formação com potencial para geração de hidrocarbonetos, e nesse estudo, foi constatado espessuras consideráveis de folhelhos ricos em COT, especialmente, no segundo poço. Dos três folhelhos radiativos aqui abordados, os folhelhos B e C se mostram mais promissores, em especial, em seus subintervalos – 125,0 m a 132,0 e 64,6 m a 74,6 m – onde, a média de COT alcança 2,72% e 2,62%, respectivamente, além de serem mais espessos quando comparados ao Folhelho A. Além disso, esses dois intervalos também possuem uma quantidade considerável de enxofre a qual também aumenta em direção ao topo, chegando a apresentarem a média de 1,24% e 3,25% no teor de S. O que pode significar, uma melhor preservação da matéria orgânica devido ao ambiente redutor, e, conseqüentemente, maior disponibilidade de hidrocarbonetos passíveis de exploração.

Entretanto, dados anteriores, como os de Rodrigues (1995) demonstram que, apesar dos teores significativos de COT, não se foi atingido a janela de maturação térmica ideal para geração desses compostos. Tal fato corrobora para a necessidade de prosseguimento das análises, em especial, na Formação Pimenteiras no que concerne à pirólise Rock – Eval com a finalidade de gerar mais discussões em torno da mencionada informação, uma vez que, esta tem se tornado precursora de estudos para a exploração de hidrocarbonetos.

O presente trabalho traz para a literatura uma das primeiras descrições faciológicas de alta resolução envolvendo a Fm. Itaim e a Fm. Pimenteiras na borda sudoeste da Bacia do Parnaíba. É importante que esses estudos continuem e os dados possam ser trabalhados, além de acrescentados em estudos posteriores, para que se consiga caracterizar com maior precisão os sistemas deposicionais envolvidos em uma Bacia que ainda carece de trabalhos, além de determinar com acurácia os níveis de interesse exploratório no que concerne a indústria de óleo e gás.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural (Circulação Externa), Superintendência de Desenvolvimento e Produção, 113, 36 p., 2020.
- ALBUQUERQUE, K.R.M. Subdivisão estratigráfica da sequência Devoniana da Bacia do Parnaíba, 2000. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 130 p, 2000.
- BERNER, R.A. *Sedimentary pyrite formation: an update. Geochimica et Cosmochimica*, Acta 48, 605–615, 1983.
- BIANCHINI, A.R. Análise e interpretação estratigráfica baseada na integração de dados de poços do intervalo Eossiluriano ao Eocarbonífero da Bacia do Parnaíba, 2018. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 130 p, 2018.
- BRITO NEVES, B. B. & FUCK, R. A. *The basement of the South American platform: Half Laurentian (N-NW) + half Gondwanan (E-SE) domains*. *Precambrian Research*, 244, 75-86, 2014.
- CAPUTO, M. V. *Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil*, 1984. Tese (Doutorado) – University of Califórnia, Santa Bárbara. 586 p, 1984.
- CATUNEANU, O. *Principles of sequence stratigraphy*. Elsevier, 2006.
- CASTRO, D.L.; FUCK, R.A.; PHILLIPS, J.D.; VIDOTTI, R.M.; BEZERRA, F.H.R. & DANTAS, E.L. *Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil*. *Tectonophysics*, 614, 128–145, 2014.
- CASTRO, D. L.; BEZERRA, F. H.; FUCK, R. A. & VIDOTTI, R. M. *Geophysical evidence of pre-sag rifting and post-rifting fault reactivation in the Parnaíba basin, Brazil*. *Solid Earth*, 7(2), 529-548, 2016.
- CORDANI, U. G.; BRITOS NEVES, B. B. & THOMAZ FILHO, R. A. Estudo Preliminar de integração do Pré-Cambriano com os eventos tectônicos das Bacias sedimentares brasileiras (Atualização). *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 17, 205–219, 2009.
- CUNHA, F.M.B. Evolução paleozóica da Bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico, 1986. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 107p, 1986.
- DALY, M. C.; FUCK, R. A.; JULIÀ, J.; MACDONALD, D. I. M. & WATTS, A. B. *Cratonic basin formation: a case study of the Parnaíba Basin of Brazil*. *Geological Society, London, Special Publications*, 472, 1-15, 14, 2018.

DELLA FÁVERA, J. C. Tempestitos na Bacia do Parnaíba, 1990. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 560 p, 1990.

DELLA FÁVERA, J.C. Fundamentos da Estratigrafia Moderna. Rio de Janeiro. Ed. UERJ. 264p., 2001.

DINO, R.; ANTONIOLI, L.; BRAZ, S. M. N. *Palynological data from the Trisidela Member of Upper Pedra de Fogo Formation (“Upper Permian”) of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil*. Revista Brasileira de Paleontologia, São Leopoldo, n. 3, p. 24-35, 2002.

EMBRY, A. & JOHANNESSEN, E. *T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada*: in T. Vorren et al., eds., Arctic Geology and Petroleum Potential: Norwegian Petroleum Society Special Publication 2, p.121-146., 1992.

ESPITALIÉ, J.; MADEC, M.; TISSOT, B.; MENNING, J.J.; LEPLAT, P. *Source rock characterization method for petroleum exploration*. Proceedings of the 9th Annual Offshore Technology Conference, Houston 1977, p. 439-44. (Paper OTC 2935), 1977.

ESPITALIÉ, J.; DEROD, M.; MARQUIS, F. *La Pyrolyse Rock-Eval et ses applications*. Rev.Inst. Français Pétrol., v. 40, p. 755-784, 1985.

FLEURANCE, S.; CUNEY, M.; MALARTRE, F., & REYX, J. *Origin of the extreme polymetallic enrichment (Cd, Cr, Mo, Ni, U, V, Zn) of the Late Cretaceous –Early Tertiary Belqa Group, central Jordan*. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 369, 201-219, 2013.

FODOR, R. V.; SIAL, A. N.; MUKASA, S. B. & MCKEE, E. H. *Petrology, isotope characteristics, and K-Ar ages of the Maranhão, northern Brazil, Mesozoic basalt province*. Contributions to Mineralogy and Petrology, 104(5), 555-567, 1990.

GALLOWAY, W. E. *Genetic Stratigraphic Sequences in Basin Analysis: I Architecture and Genesis of Flooding-Surface Bounded Depositional Units*. AAPG Bull. 73(2): 125-142, 1989.

GÓES, A. M. O.; TRAVASSOS, W. A. S.; NUNES, K. Projeto Parnaíba: reavaliação da Bacia e perspectivas exploratórias. Relatório Interno: Petrobrás – Depex, Rio de Janeiro, 1993.

GÓES, A.M.O. & FEIJÓ, F.J. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, v. 8, p. 57–67, 1994.

GÓES, A. M. Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba, 1995. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

HEILBRON, M.; GUEDES, E.; MANE, M.; VALERIANO, C. M.; TUPINAMBÁ, M.; ALMEIDA, J.; SILVA, L. G. E.; PASCHOAL DUARTE, B.; FAVERA, J. C. D. & VIANA, A. *Geochemical and temporal provinciality of the magmatism of the eastern*

Parnaíba Basin, NE Brazil. Geological Society, London, Special Publications, 472, 251-278, 2018.

LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética: relatório final da etapa III. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 212 p, 1978.

MARTINS, L.P. Estratigrafia Química e potencial gerador da Formação Pimenteirás, Bacia do Parnaíba, 2018. Rio de Janeiro, Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 172 p, 2019.

MENDONÇA FILHO, J.G.; CARVALHO, M. A., MENEZES, T. R. Palinofácies – técnicas e procedimentos de trabalho com formas fósseis e formas comparativas atuais. São Leopoldo, UNISINOS - Publicação Especial, p. 20-24, 2002.

MENEZES, T. R., MENDONÇA FILHO, J. G., ARAÚJO, C. V., SOUZA, I. V. A. F., MENDONÇA, J. O. Fácies orgânica: conceitos, métodos e estudos de casos na indústria do petróleo. *Brazilian Journal of Geology*, 38(2), 80-96, 2008.

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S.; STREEL, M. *Latest devonian to early late carboniferous biostratigraphy of Northern Brazil: an update*. Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production, Pau, v. 22, n. 1, p. 13-33, 1998.

MILANI, E. J. & THOMAZ FILHO, A. *Sedimentary basins of South America*. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., Thomaz Filho, A., Campos, D. A. Tectonic Evolution of South America, 31th International Geological Congress. Rio de Janeiro, 389-452, 2000.

MOCITAIBA, L.; CASTRO, D. & OLIVEIRA, D. Cartografia geofísica regional do magmatismo mesozoico na Bacia do Parnaíba. *Geologia USP. Série Científica*, v. 17, n. 2, p. 169-192, 2017.

OLIVEIRA, A. L.; PIMENTEL, M. M.; FUCK, R. A. & OLIVEIRA, D. C. *Petrology of Jurassic and Cretaceous basaltic formations from the Parnaíba Basin, NE Brazil: correlations and associations with large igneous provinces*. Geological Society, London, Special Publications, 472, 279-308, 2018.

PONCIANO, L.C.M.O. & DELLA FÁVERA, J.C. *Flood-dominated fluvio-deltaic system: a new depositional model for the Devonian Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Piauí, Brazil*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 81(4): 769-780, 2009.

POSAMENTIER, H.W. & VAIL, P.R. *Eustatic controls on clastic deposition II – Conceptual Framework*. In: WILGUS, C.K.; HASTINGS, B.S.; KENDALL, C.G.ST.C.; POSAMENTIER, H.W.; ROSS, C.A.; VAN WAGONER, J.C. (eds). *Sea-level Changes – An Integrated Approach*. Tulsa, Oklahoma: SEPM Geology, Special Publication. n. 42, p. 125-154, 1988.

RODRIGUES, R. A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba. 1995. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, 225 p, 1995.

- RODRIGUES, R.; LOBOZIAK, S.; MELO, J.H.G.; ALVES, D.B. *Geochemical characterization and miospore biostratigraphy of the Frasnian anoxic event in the Parnaíba Basin, Northeast Brazil*. Bull. Centres Rech. Explo. – Prod. Elf Aquitaine 19 (2), 319–327, 1995.
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. A passagem Aptiano - Albiano na Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, p.101-117, 2001.
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JUNIOR, A. E. Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, p. 67-76, 2001.
- STEEMANS, P.; PEREIRA, E.; LE HÉRISSE, A.; GRAHN, Y.; STREEL, M.; BRITO, M.; BERGAMASCHI, S.; RODRIGUES, R. *Palynology and geochemistry of the Frasnian global transgression in the Parnaíba Basin, Brazil*. Review of Palaeobotany and Palynology, 284, 104345, 2021.
- SZATMARI, P. & PORTO, R. *Classification of Onshore Sedimentary Basins in Brazil*. Boletim AAPG, v. 66, n. 5, p. 618-619, 1982.
- TYSON, R. V. *Sedimentary Organic Matter*. Londres, Chap. & Hall, 615 p, 1995.
- VAZ, P.T.; REZENDE, N.G.A.M.; WANDERLEY FILHO, J.R. & SILVA TRAVASSOS, W.A. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da Petrobras, 15, 253–263, 2007.
- VAIL, P.R. *Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure*. AAPG Studies in Geology, Tulsa, v. 27, p. 1-9, 1987.
- VAIL, P.R.; HARDENBOL, J.; TODD, R.G. *Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy*. Tulsa, Oklahoma: AAPG Studies in Geology, Memoir 36, p.129-144, 1984.
- VAIL, P.R., MITCHUM, R.M. JR., TODD R.G., WIDMIER, J.M., THOMPSON, S., SANGREE, J.B., BUBB, J.N. & HATLELID, W.G. *Seismic stratigraphy – applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir 26: 49 – 212, 1977.
- VAN WAGONER, J.C.; MITCHUM, R.M.; CAMPION, K.M. & RAHMANIAN, V.D. *Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies*. AAPG Methods in Exploration Series, n. 7, 1990.
- WALKER, R. G. *Facies, facies models and modern stratigraphic concepts*: In: Facies Models, edited by Walker, R.G., and N.P. James, Geological Association of Canada, p. 1- 14, 1992.

WILGUS, C.K.; HASTINGS, B.S.; KENDALL, C.G.ST.C.; POSAMENTIER, H.W.; ROSS, C.A. & VAN WAGONER, J.C. *Sea-level changes: an integrated approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, v. 42, p. 407, 1988.

YOUNG, C.G.K. Contribuição à análise da Formação Pimenteira (Devoniano, Bacia do Parnaíba): caracterização de um potencial intervalo de rochas reservatório, 2003. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 84p, 2003.

YOUNG, C.G.K. Estratigrafia de alta resolução da Formação Pimenteira (Devoniano, Bacia do Parnaíba), 2006. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 174 p, 2006.

ZAMBRANO, E. R. N.; DE OLIVEIRA, O. M. C.; SEVERIANO RIBEIRO, H. J. P. Caracterização geoquímica com indícios paleoambientais de folhelhos da Formação Pimenteiras, estado do Tocantins, Bacia do Parnaíba, Brasil. *Revista do Instituto de Geociências, USP, São Paulo*, v. 17, n. 3, p. 7-78, 2017.

APÊNDICE A – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 283,8 m a 256,90 m (superior) e de 256,90m a 228,90 m (inferior)



APÊNDICE B - Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 217 m a 200,90 m (superior) e de 204,90 m a 172,90 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE C – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 172,90m a 145,30m (superior) e de 145,30 m a 117,60 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE D – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 117,60 m a 90,40 m (superior) e de 90,40 m a 64 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE E – Imagem do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 64 m a 37 m (superior) e de 37 m a 3,50 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE F – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 334,80 m a 301,80 m (superior) e de 301,80 m a 273,20 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021

APÊNDICE G – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 273,20 m a 242 m (superior) e de 242 m a 209 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE H – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 209 m a 176,50 m (superior) e de 176,50 m a 143,30 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.

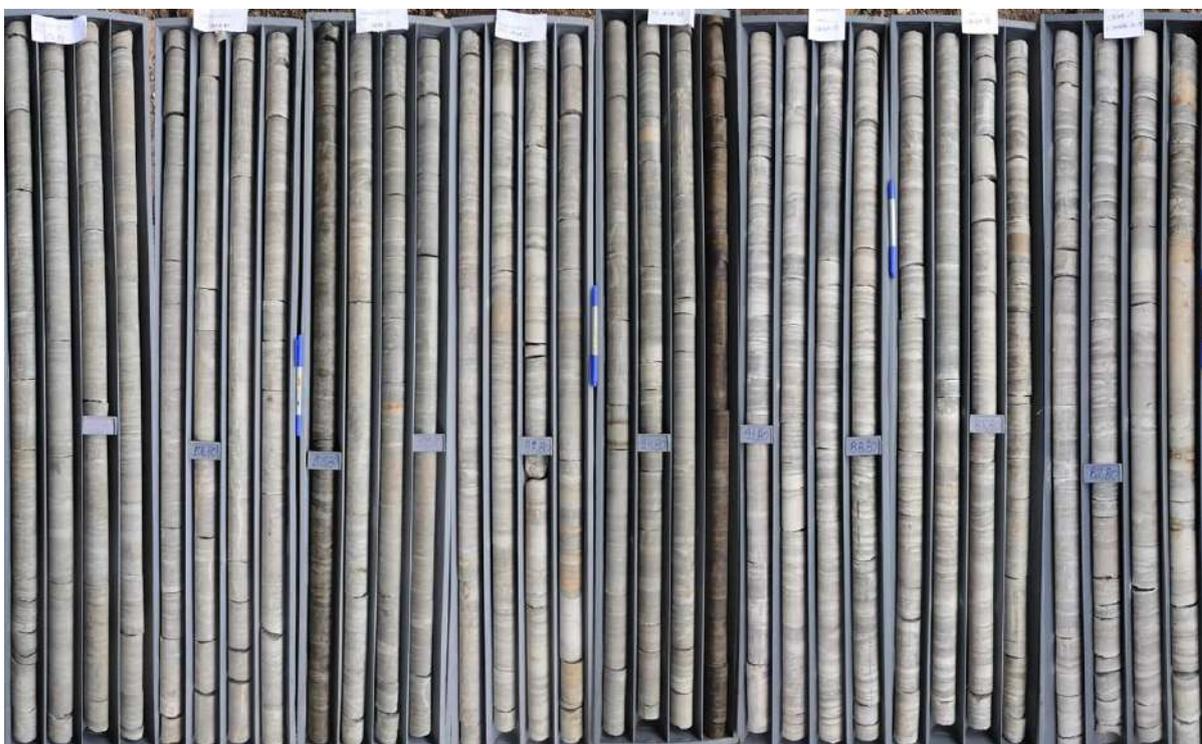


Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE I – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 143,30 m a 111,30 m (superior) e de 111,30 m a 79,30 m (inferior)



Fonte: A autora, 2021.



Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE J – Imagem do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 79,30 m a 47 m (superior) e de 47 m a 15,70 m (inferior)

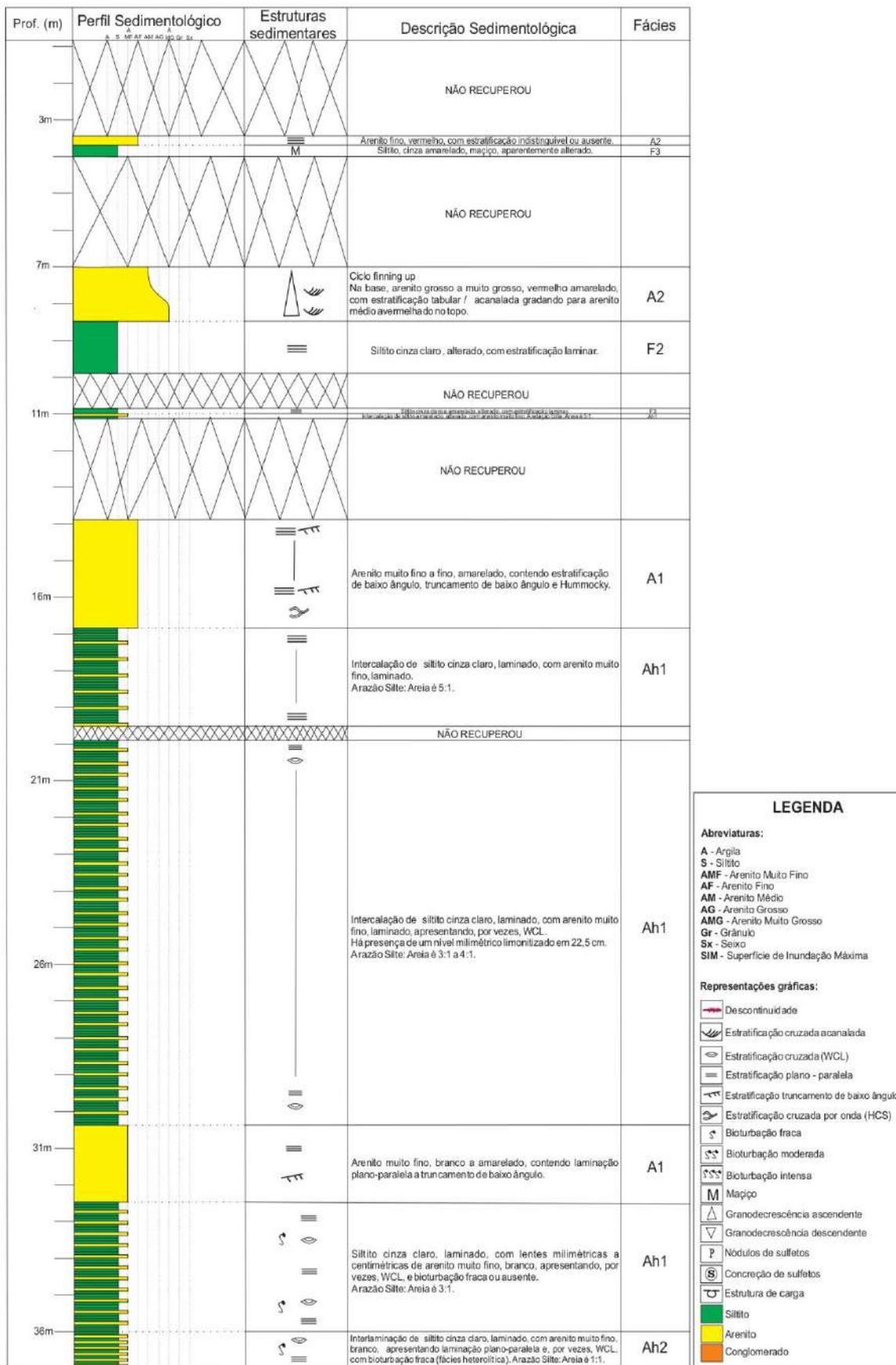


Fonte: A autora, 2021.

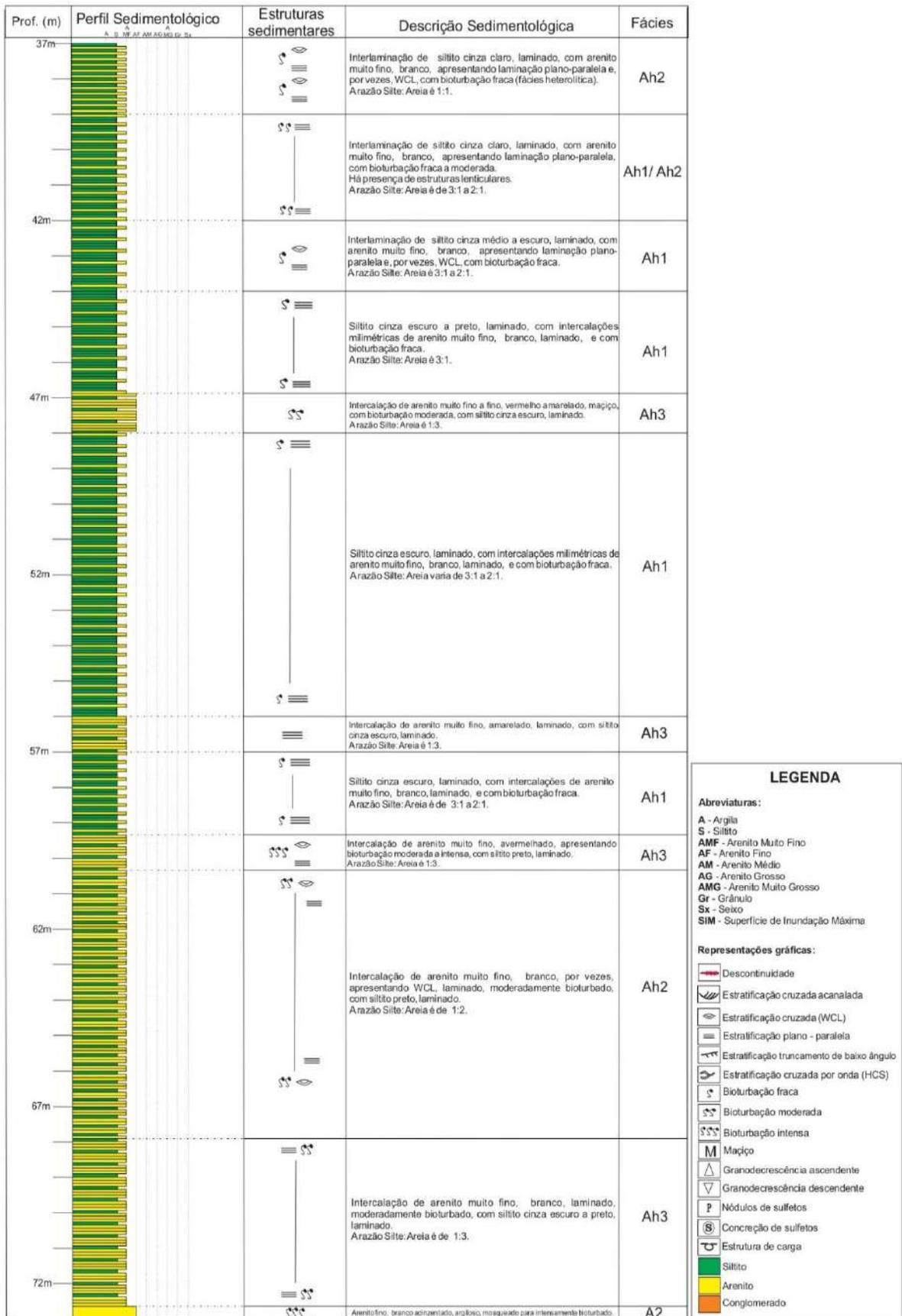


Fonte: A autora, 2021.

APÊNDICE K - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 7 m a 36 m



APÊNDICE L - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 37 m a 72 m



APÊNDICE M - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 73 m a 108 m

Prof. (m)	Perfil Sedimentológico A S MF AF AM AG MG Gr Sx	Estruturas sedimentares	Descrição Sedimentológica	Fácies
73m			Arenito fino, branco acinzentado, argiloso, mosqueado para intensamente bioturbado.	A2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, moderadamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Siltite:Areia é de 1:2.	Ah2
			Arenito fino, avermelhado, duro e com estratificação incipiente.	A2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, moderadamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Siltite:Areia é de 1:2.	Ah2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Siltite:Areia é de 1:1.	Ah2
			Intercalação de siltito cinza escuro a preto, laminado, com níveis centimétricos de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado, com . A razão Siltite:Areia varia de 4:1 a 3:1.	Ah1
			Intercalação de siltito preto, laminado, com níveis centimétricos de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado. A razão Siltite:Areia é de 3:1.	Ah1
			Intercalação de siltito cinza escuro a preto, laminado, com arenito muito fino, branco, laminado, apresentando WCL e bioturbação fraca. A razão Siltite:Areia é de 2:1.	Ah2
			Folhelho preto, fracamente laminado, contendo intercalações milimétricas de arenito muito fino, branco, laminado e, por vezes, apresentando WCL. SIM - Folhelho C	F1
			Arenito muito fino, esbranquiçado, maço.	A2
			Folhelho preto, laminado.	F1
			Arenito muito fino, esbranquiçado, maço, por vezes, moderadamente bioturbado para moqueado, contendo WCL.	A2
			Folhelho preto, finamente laminado.	F1
108m				

LEGENDA

Abreviaturas:

- A - Argila
- S - Siltito
- AMF - Arenito Muito Fino
- AF - Arenito Fino
- AM - Arenito Médio
- AG - Arenito Grosso
- AMG - Arenito Muito Grosso
- Gr - Grânulo
- Sx - Seixo
- SIM - Superfície de Inundação Máxima

Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanalada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Maço
- Granodrecrescência ascendente
- Granodrecrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

APÊNDICE M - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 73 m a 108 m

Prof. (m)	Perfil Sedimentológico A S MF AF AM AG MG Gr Sx	Estruturas sedimentares	Descrição Sedimentológica	Fácies
73m			Arenito fino, branco acinzentado, argiloso, mosqueado para intensamente bioturbado.	A2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, moderadamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Silt:Areia é de 1:2.	Ah2
			Arenito fino, avermelhado, duro e com estratificação incipiente.	A2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, moderadamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Silt:Areia é de 1:2.	Ah2
			Intercalação de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado, com siltito cinza escuro. A razão Silt:Areia é de 1:1.	Ah2
			Intercalação de siltito cinza escuro a preto, laminado, com níveis centimétricos de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado, com . A razão Silt:Areia varia de 4:1 a 3:1.	Ah1
			Intercalação de siltito preto, laminado, com níveis centimétricos de arenito muito fino, branco, laminado, fracamente bioturbado. A razão Silt:Areia é de 3:1.	Ah1
			Intercalação de siltito cinza escuro a preto, laminado, com arenito muito fino, branco, laminado, apresentando WCL e bioturbação fraca. A razão Silt:Areia é de 2:1.	Ah2
			Folhelho preto, fracamente laminado, contendo intercalações milimétricas de arenito muito fino, branco, laminado e, por vezes, apresentando WCL. SIM - Folhelho C	F1
			Arenito muito fino, esbranquiçado, maço.	A2
			Folhelho preto, laminado.	F1
			Arenito muito fino, esbranquiçado, maço, por vezes, moderadamente bioturbado para moqueado, contendo WCL.	A2
			Folhelho preto, finamente laminado.	F1
108m				

LEGENDA

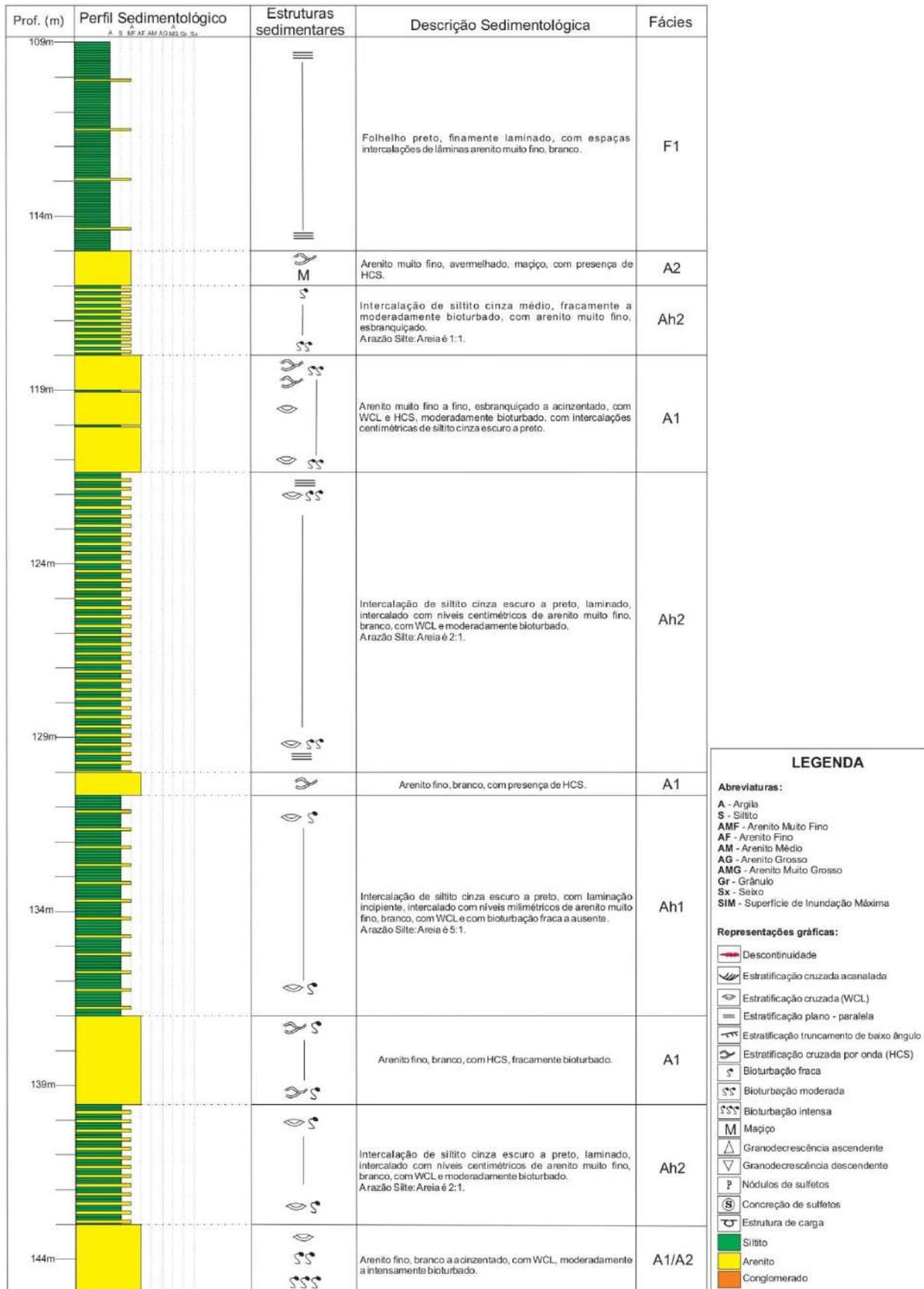
Abreviaturas:

- A - Argila
- S - Siltito
- AMF - Arenito Muito Fino
- AF - Arenito Fino
- AM - Arenito Médio
- AG - Arenito Grosso
- AMG - Arenito Muito Grosso
- Gr - Grânulo
- Sx - Seixo
- SIM - Superfície de Inundação Máxima

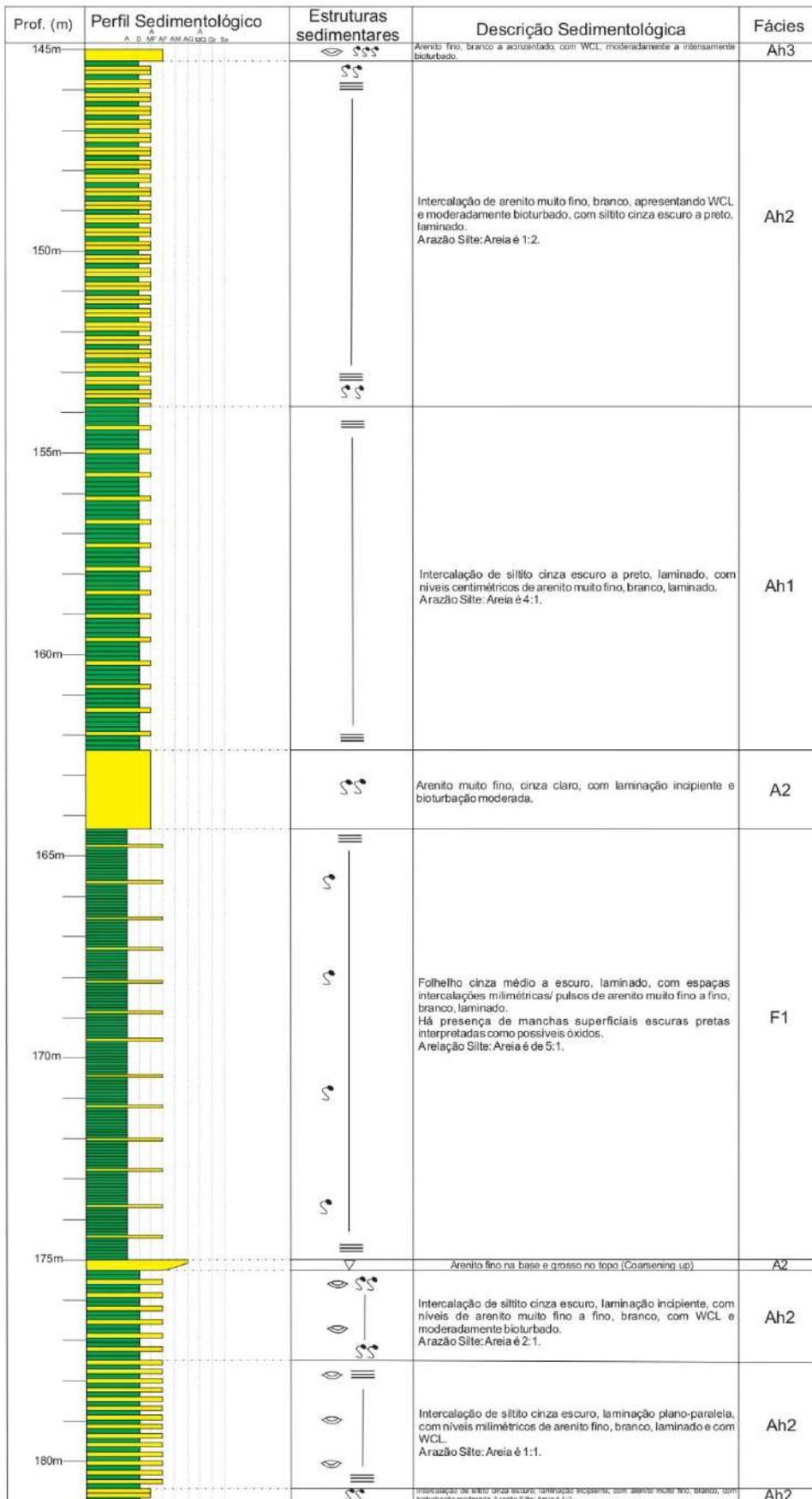
Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanalada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Maço
- Granodrecrescência ascendente
- Granodrecrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

APÊNDICE N - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 109 a 144 m



APÊNDICE O - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 145 m a 180 m



LEGENDA

Abreviaturas:
A - Argila
S - Siltito
AMF - Arenito Muito Fino
AF - Arenito Fino
AM - Arenito Médio
AG - Arenito Grosso
AMG - Arenito Muito Grosso
Gr - Grânulo
Sx - Seixo
SIM - Superfície de Inundação Máxima

Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanalada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Mação
- Grandocrescência ascendente
- Grandocrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

APÊNDICE P - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 181 m a 216 m

Prof. (m)	Perfil Sedimentológico	Estruturas sedimentares	Descrição Sedimentológica	Fácies
181m			Intercalação de siltito cinza escuro, laminação incipiente, com arenito muito fino, branco, com bioturbação moderada. Arazão Silte:Areia é 1:2.	Ah2
186m			Arenito fino, branco, laminação plano-paralela e apresentando HCS, sendo Intercalado por níveis de siltito cinza interlaminao por arenito muito fino, branco, com bioturbação moderada.	A1/ Ah2
186m			Intercalação de siltito cinza médio, laminação incipiente, bioturbação fraca, com arenito muito fino, branco, laminado. Arazão Silte: Areia é 5:1.	Ah1
191m			Intercalação de siltito cinza médio, laminação incipiente, bioturbação fraca, com níveis milimétricos de arenito muito fino, branco, laminado. Arazão Silte: Areia varia de 3:1 a 5:1.	Ah1
196m			Arenito fino, branco a acinzentado, intensamente bioturbado a mosqueado.	A2
201m			Arenito fino, branco, laminação plano-paralela e contendo HCS.	A1
201m			Intercalação de siltito cinza escuro, laminação incipiente, com arenito muito fino, branco, com bioturbação moderada. Arazão Silte: Areia é 1:2.	Ah2
206m			Intercalações de arenito muito fino a fino, branco, maciço a laminado, por vezes, apresentando HCS, sendo interlaminao por siltito cinza escuro com laminação incipiente e arenito muito fino, branco, laminado e intensamente bioturbado.	A1/ Ah2
211m			Arenito fino, branco, com HCS e com finas intercalações de siltito preto.	A1
216m			Camadas centimétricas de arenito fino, branco, com HCS, sendo intercaladas por siltito, preto, com laminação incipiente e arenito muito fino, branco, laminado, por vezes, apresentando WCL, intensamente bioturbado.	A1/ Ah2

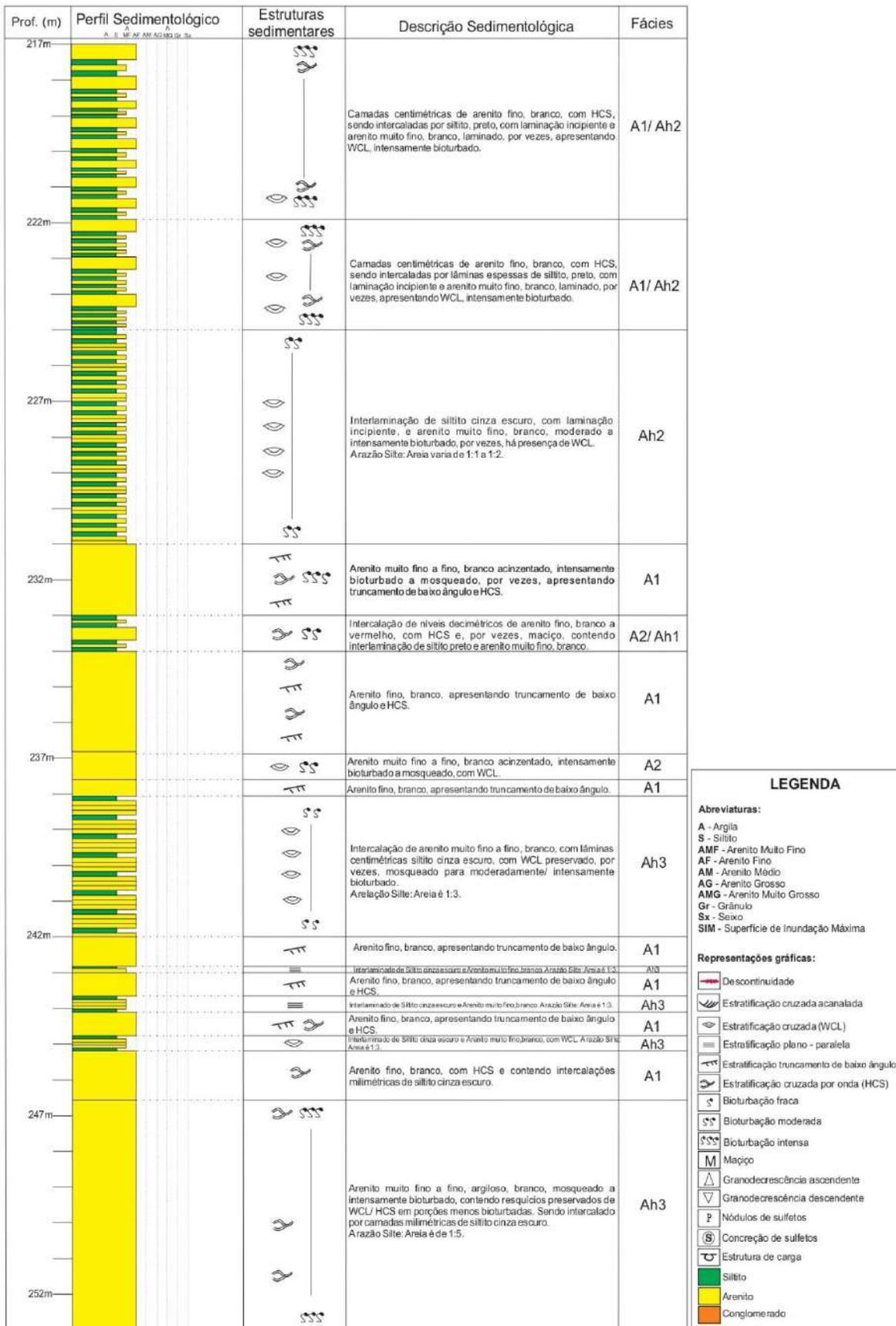
LEGENDA

Abreviaturas:
A - Argila
S - Siltito
AMF - Arenito Muito Fino
AF - Arenito Fino
AM - Arenito Médio
AG - Arenito Grosso
AMG - Arenito Muito Grosso
Gr - Grânulo
Sx - Seixo
SIM - Superfície de Inundação Máxima

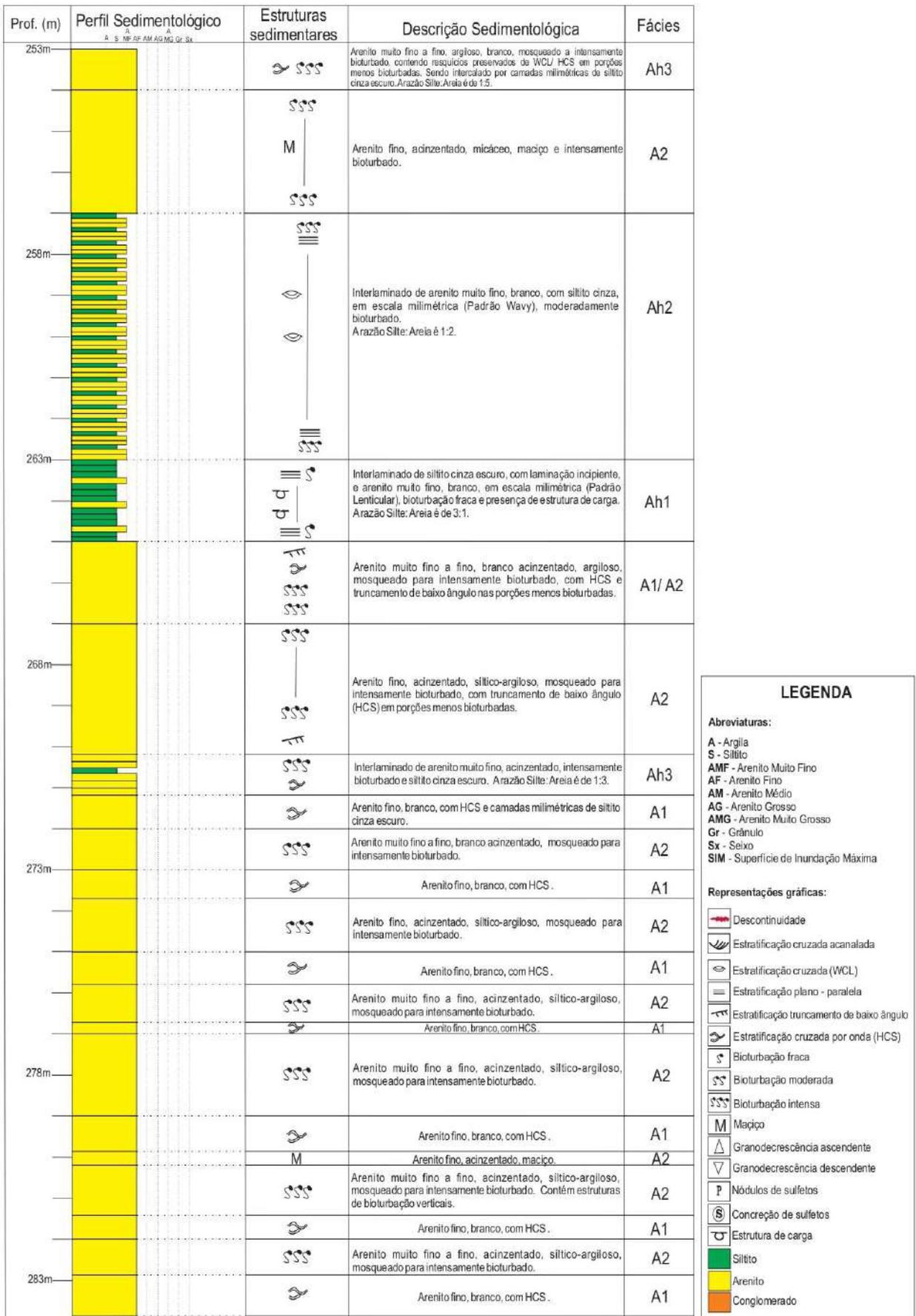
Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanalada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Maciço
- Granodrecrescência ascendente
- Granodrecrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

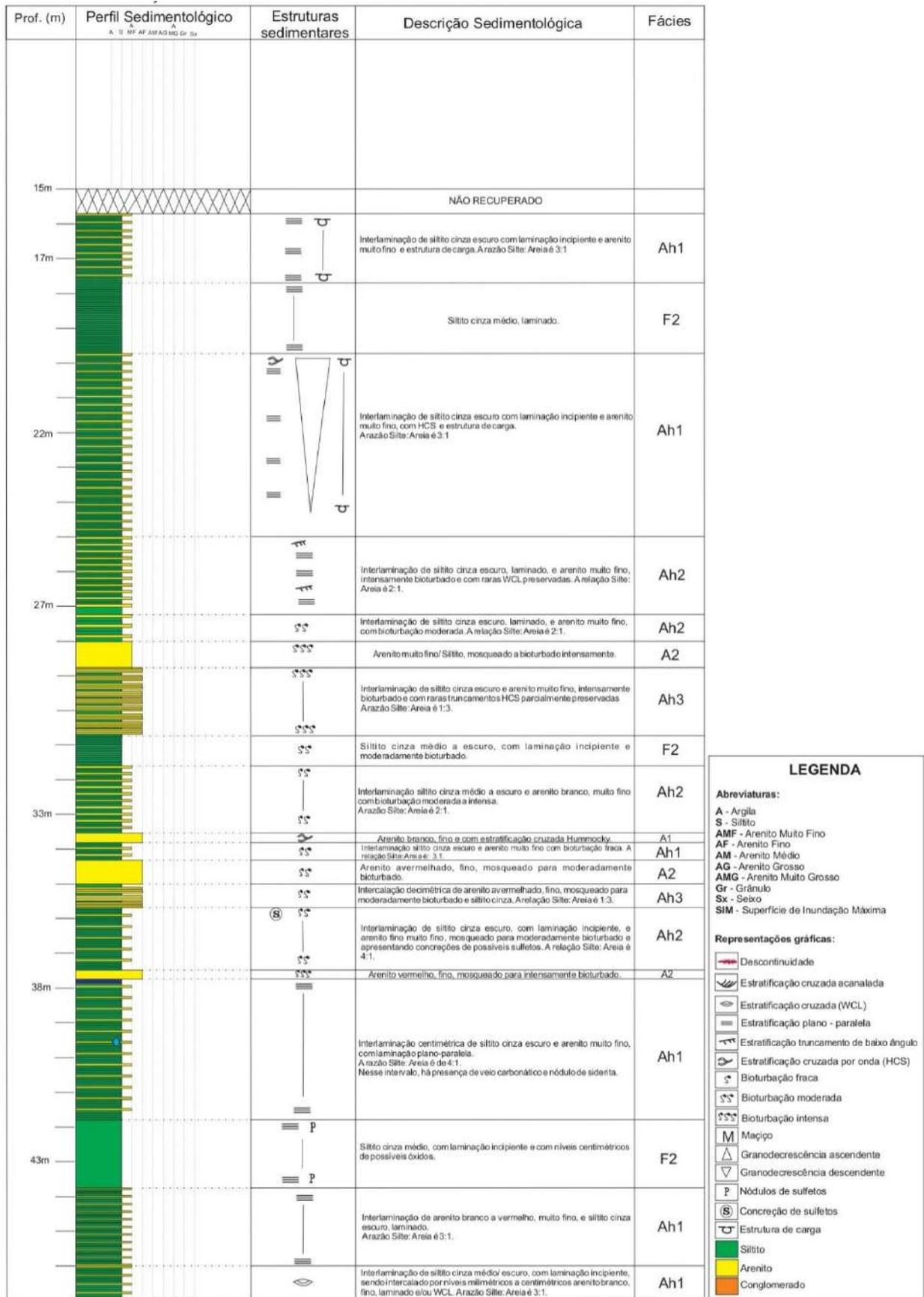
APÊNDICE Q - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 217 m a 252 m



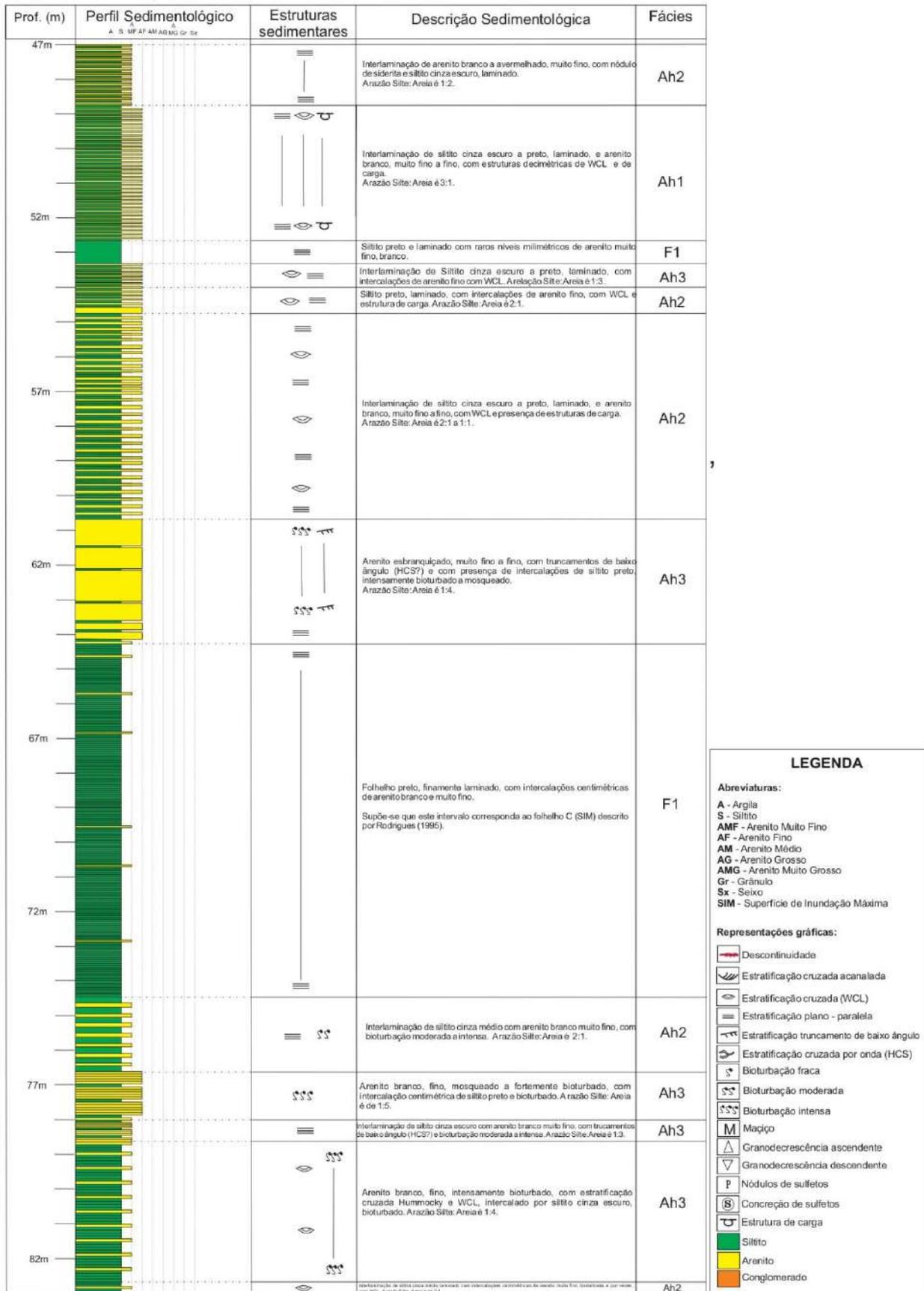
APÊNDICE R - Descrição do testemunho GASBRAS-1-RS-TO de 253 m a 283 m



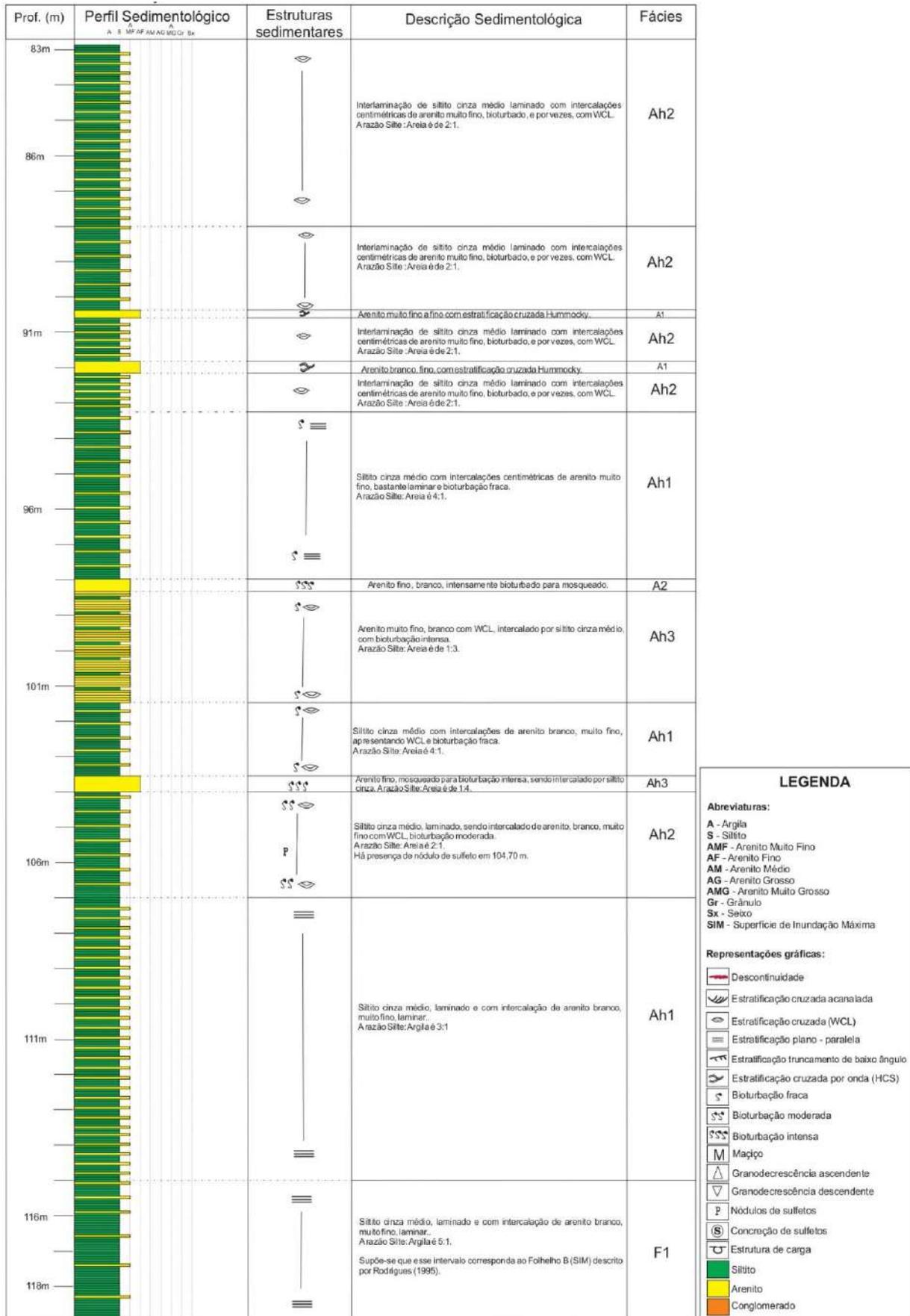
APÊNDICE S - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 15 m a 46 m



APÊNDICE T - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 47m a 82 m



APÊNDICE U - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 83 m a 118 m



APÊNDICE V - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 119m a 154 m

Prof. (m)	Perfil Sedimentológico A S MF AF AMG Gr Sx	Estruturas sedimentares	Descrição Sedimentológica	Fácies
119m			Siltito cinza médio, laminado e com intercalação de arenito branco, muito fino, laminar. Arazão Silte: Argila é 5:1. Supõe-se que esse intervalo corresponda ao Folheto B (SIM) descrito por Rodrigues (1995).	F1
		M	Arenito branco a vermelho, fino, maciço com <i>hardground</i> no topo.	A2
			Arenito branco a acinzentado, fino, com bioturbação intensa, miciação e homogêneo com intercalações de siltito. Arazão de silte: areia é 1:4.	Ah3
124m			Siltito cinza escuro a preto, laminado, com intercalações centimétricas de arenito branco, muito fino, laminado. Níveis pretos devido, aparentemente, a presença de óxido. Arazão Silte: Areia é 3:1. Supõe-se que este intervalo corresponda ao folheto B (SIM) descrito por Rodrigues (1995).	F1
129m			Interlaminação de siltito cinza médio, laminado e arenito branco, muito fino, laminado e fracamente bioturbado. A razão Silte: Areia é 3:1	Ah1
134m			Interlaminação de siltito cinza médio a escuro e arenito branco, muito fino, com laminação incipiente a presença de WCL, além disso, com bioturbação moderada. A razão Silte: Areia é 2:1.	Ah2
139m			Arenito branco, muito fino a fino, apresentando estratificação cruzada Hummocky com espessuras decimétricas, intercalado por siltito cinza escuro, laminar. A razão Silte: Areia é 1,5.	A1/ F2
144m			Siltito cinza médio, laminado, com intercalações milimétricas de arenito branco, muito fino a fino, apresentando WCL e com bioturbação moderada. A razão Silte: Areia é 2:1.	Ah2
149m			Siltito cinza claro, laminado, com intercalações milimétricas de arenito branco, muito fino a fino, apresentando WCL. A razão Silte: Areia é 2:1.	Ah2
154m			Siltito cinza claro, laminado, com intercalações milimétricas de arenito branco, muito fino a fino, laminar. A razão Silte: Areia é 4:1.	Ah1

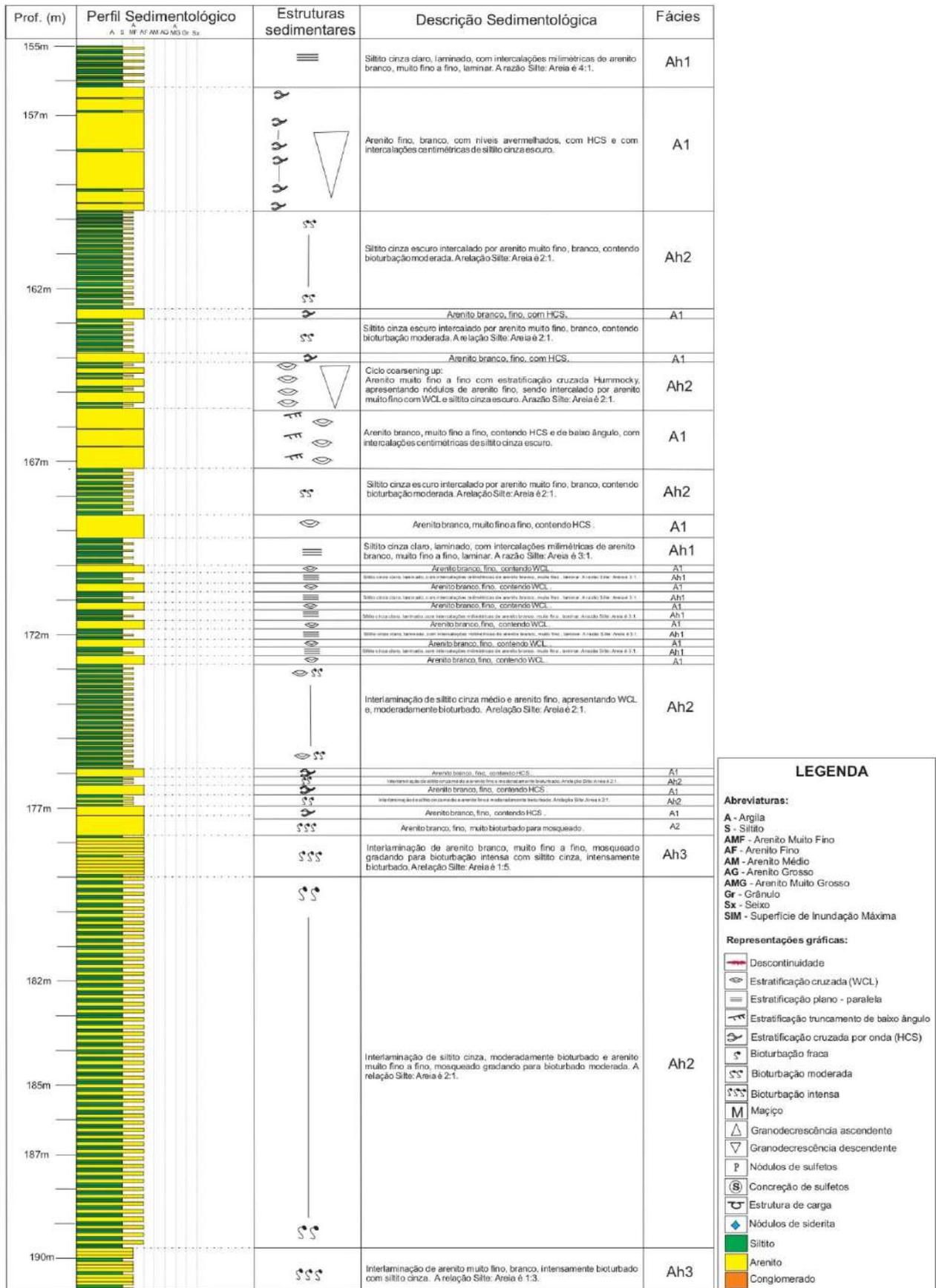
LEGENDA

Abreviaturas:
A - Argila
S - Siltito
AMF - Arenito Muito Fino
AF - Arenito Fino
AM - Arenito Médio
AG - Arenito Grosso
AMG - Arenito Muito Grosso
Gr - Grânulo
Sx - Seixo
SIM - Superfície de Inundação Máxima

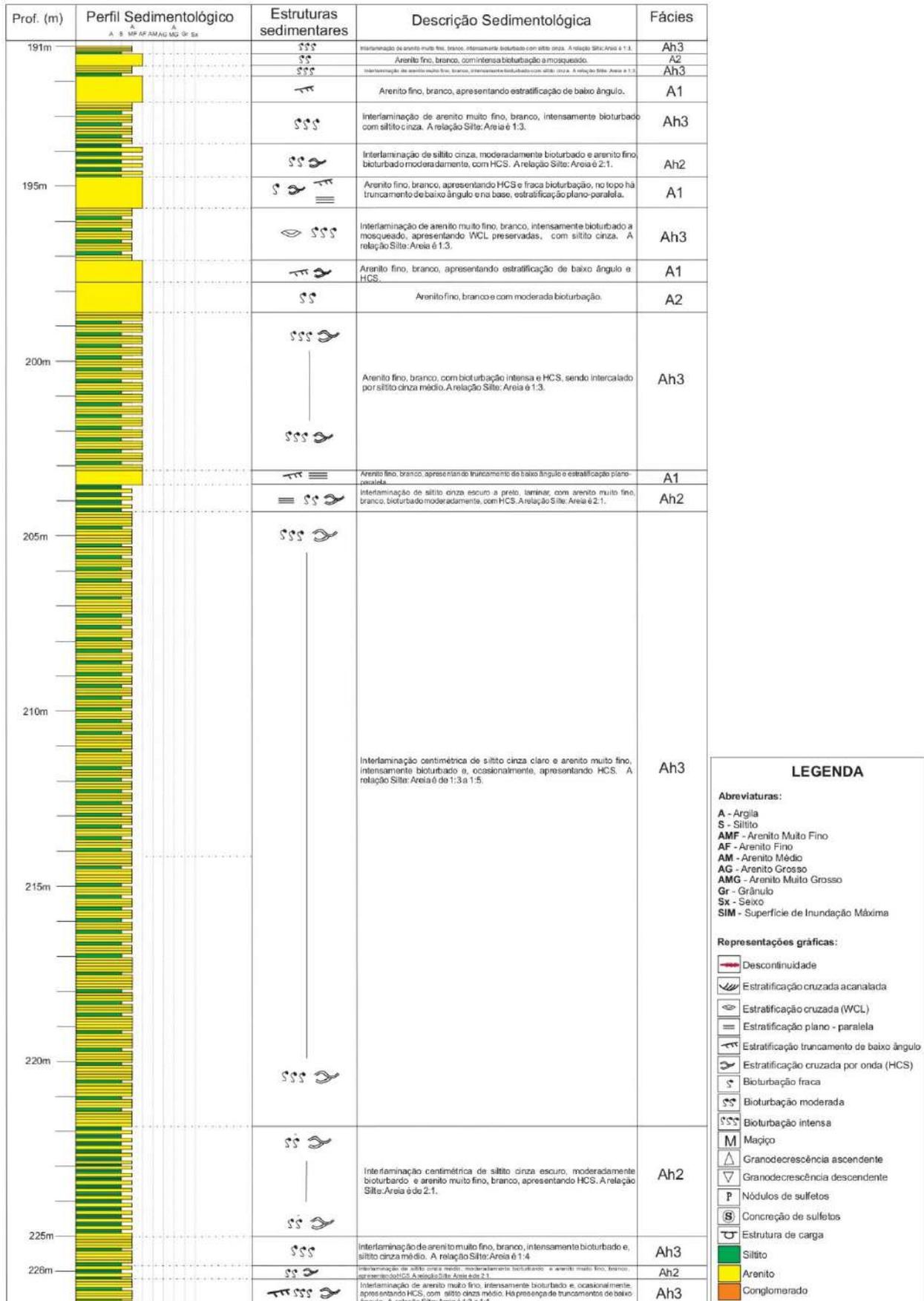
Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanalada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Mação
- Granodecrescência ascendente
- Granodecrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

APÊNDICE W - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 155m a 190m



APÊNDICE X - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 191m a 226 m



APÊNDICE Y - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 227m a 262 m

Prof. (m)	Perfil Sedimentológico A S MF AF AMG Gr Si	Estruturas sedimentares	Descrição Sedimentológica	Fácies
227m			Interlaminação de arenito muito fino, intensamente bioturbado e, ocasionalmente, apresentando HCS, com siltito cinza médio. Há presença de truncamentos de baixo ângulo. A relação Silte: Areia é 1:3 a 1:4.	Ah3
			Arenito fino, branco, com HCS.	A1
			Arenito fino, branco, mosqueado para altamente bioturbado.	A2
			Arenito fino, branco, com HCS e truncamento de baixo ângulo.	A1
233m			Arenito fino, branco, mosqueado para altamente bioturbado.	A2
			Arenito fino, branco a cinza, com HCS e laminado.	A1
			Arenito fino, branco a cinza e intensamente bioturbado.	A2
			Arenito fino, branco a cinza e laminado.	A1
238m			Arenito fino, branco a cinza médio e intensamente bioturbado.	A2
			Arenito fino, branco a cinza, com HCS e laminado.	A1
243m			Arenito fino, branco a cinza, com HCS e laminado.	A1
			Interlaminação de arenito muito fino, branco, intensamente bioturbado para mosqueado com níveis decimétricos de siltito cinza, laminar. A relação Silte: Areia é 1:3.	Ah3
248m			Arenito fino, branco a cinza claro a médio, com HCS e laminado.	A1
			Interlaminação de arenito muito fino, branco, intensamente bioturbado para mosqueado com níveis decimétricos de siltito cinza claro a médio, laminar. A relação Silte: Areia é 1:4.	Ah3
253m			Arenito fino, branco a avermelhado, com HCS, truncamento de baixo ângulo e laminado. Com presença de siltito preto, laminar, com 5 cm.	A1
			Interlaminação de arenito muito fino, branco, com siltito cinza sendo ambos intensamente bioturbado para mosqueado. A relação Silte: Areia é 1:3.	Ah3
258m			Arenito fino branco, com presença de truncamentos de baixo ângulo e HCS.	A1
262m			Arenito fino branco, intensamente bioturbado para mosqueado. Vai de 262 m a 263,20 m.	A2

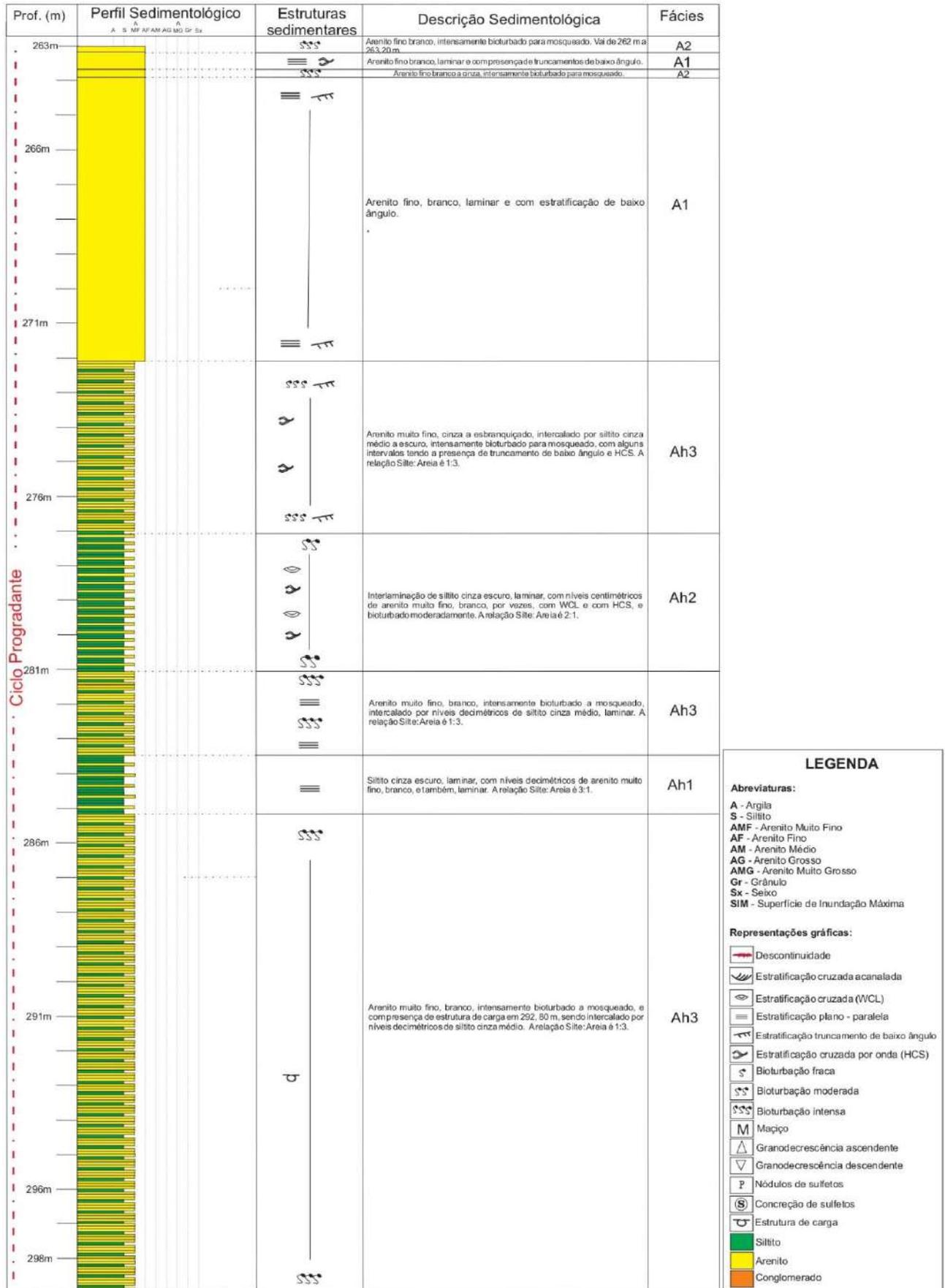
LEGENDA

Abreviaturas:
A - Argila
S - Siltito
AMF - Arenito Muito Fino
AF - Arenito Fino
AM - Arenito Médio
AG - Arenito Grosso
AMG - Arenito Muito Grosso
Gr - Grânulo
Sx - Seixo
SIM - Superfície de Inundação Máxima

Representações gráficas:

- Descontinuidade
- Estratificação cruzada acanetada
- Estratificação cruzada (WCL)
- Estratificação plano - paralela
- Estratificação truncamento de baixo ângulo
- Estratificação cruzada por onda (HCS)
- Bioturbação fraca
- Bioturbação moderada
- Bioturbação intensa
- Maço
- Granodrecrescência ascendente
- Granodrecrescência descendente
- Nódulos de sulfetos
- Concreção de sulfetos
- Estrutura de carga
- Siltito
- Arenito
- Conglomerado

APÊNDICE Z - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 263m a 298 m



APÊNDICE AA - Descrição do testemunho GASBRAS-2-RS-TO de 299 m a 335 m

