Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Geologia

Daniel Antonio Peçanha De Martino Ferreira

Caracterização organofaciológica e organogeoquímica de sedimentos das Formações Muribeca e Riachuelo, Cretáceo inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas

Rio de Janeiro
2018

Daniel Antonio Peçanha De Martino Ferreira

Caracterização organofaciológica e organogeoquímica de sedimentos das Formações Muribeca e Riachuelo, Cretáceo inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas

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 e Faixas Móveis.

Orientador: Prof.ª Dra. Luzia Antonioli

Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo Dino

Rio de Janeiro

2018

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

F383 Ferreira, Daniel Antonio Peçanha de Martino.
Caracterização organofaciológicae organogeoquímica de sedimentos da formação Muribeca e Riachuelo, Cretáceo inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas / Daniel Antonio Peçanha de Martino Ferreira.
– 2018.
xx f.: il.

Orientador: Luzia Antonioli.
Coorientador: Rodolfo Dino.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Palinofáceis (Geologia) – Sergipe-Alagoas, Bacia de – Teses. 2. Geoquímica orgânica - Sergipe-Alagoas, Bacia de – Teses. 3. Hidrocarbonetos – Sergipe-Alagoas, Bacia de – Teses. 4. Geologia estratigráfica – Cretáceo – Sergipe-Alagoas, Bacia de – Teses. I. Antonioli. Luzia. II. Dino, Rodolfo. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 902.67(813.4/.7)

Bibliotecária Responsável: Taciane Fereira da Silva / CRB-7: 6337

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

_____ _____

Assinatura Data

Daniel Antonio Peçanha de Martino Ferreira

Caracterização organofaciológica e organogeoquímica de sedimentos das Formações Muribeca e Riachuelo, Cretáceo inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas

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

Aprovada em 30 de novembro de 2018.

Orientadora: Profª. Drª. Luzia Antonioli

Faculdade de Geologia – UERJ

Coorientador: Prof. Dr. Rodolfo Dino

Faculdade de Geologia – UERJ

Banca Examinadora:

_____

Dra. Elizabete Pedrão

Petróleo Brasileiro S.A. / CENPES

_____

Dra. Maria Judite Garcia

Universidade de São Paulo – USP

_____

MSc. Loren Pinto Martins

Faculdade de Geologia – UERJ

Rio de Janeiro

2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em memória do meu avô Darcy Peçanha e minha avó Maria Eunice Peçanha.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a todas as pessoas que me ajudaram na realização deste sonho, mas em especial gostaria de agradecer a todas estas pessoas citadas abaixo, pois estas tiveram fundamental importância para a conclusão deste trabalho.

Sendo assim, agradeço a minha "mãedrinha" Liane Magaly Peçanha pelo suporte ao longo desta caminhada me ajudando em todos os aspectos da minha vida permitindo assim foco total na realização deste trabalho.

Ao meu filho Gabriel Nobre Damiani De Martino pelos maravilhosos momentos que passamos juntos que serviram como combustível para seguir em frente.

A minha namorada Beatriz de Carvalho Guimarães que nunca desistiu de mim, nem nos momentos de maior dificuldade me dando apoio, força, carinho e principalmente muita paciência.

A minha orientadora Drª. Luzia Antonioli pelo carinho, atenção, apoio e paciência depositados ao longo desta jornada, e também pelo acompanhamento e suporte necessários para a conclusão dessa Dissertação.

Ao professor Dr. Rodolfo Dino e a Dra. Helena Antunes Portela que participaram de todo o processo de elaboração deste trabalho com sugestões e críticas construtivas ao longo dos seminários apresentados e que permitiram melhoras substanciais no trabalho.

A minha amiga Loren Martins, por ter me ajudado na confecção de figuras de suma importância para o trabalho como também por sua contribuição com sugestões e dicas com o objetivo de enriquecer o trabalho.

Agradeço também a Agência Nacional do Petróleo (ANP) e a minha empresa Capgemini pela compreensão quando precisei me ausentar do escritório para poder resolver os assuntos relacionados ao mestrado. Fica também registrado outro agradecimento a ANP por disponibilizar seu microscópio para descrição das lâminas.

E por fim, mas não menos importante aos funcionários do Laboratório de Palinomacerais (LBPM) Laboratório de Geoquímica Orgânica (LGQM) e a Secretaria do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Geologia /UERJ mais especificamente a Marianni e a Jussara por todo auxílio prestado.

RESUMO

FERREIRA, Daniel Antonio Peçanha de Martino. *Caracterização organofaciológica e organogeoquímica de sedimentos das Formações Muribeca e Riachuelo, Cretáceo inferior da Bacia de Sergipe-Alagoas*. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O presente trabalho aborda resultados obtidos com a integração dos dados organogeoquímicos e organopalinológicos, realizados em 23 amostras de folhelhos e carbonatos testemunhados no poço 9-PEO-12-SE, localizado na região sul da Bacia de Sergipe-Alagoas, porção *onshore*. Buscou-se caracterizar o conteúdo orgânico particulado, quanto ao estado de preservação e maturação térmica e avaliar as condições redox, as quais esses sedimentos estiveram submetidos. Os resultados das análises de microscopia óptica em luz branca e fluorescência indicam que grande parte do material orgânico, apesar dos estratos serem considerados como de origem marinha, é dominado por elementos alóctones, representado, principalmente, pelo grupo dos fitoclastos (opacos e não-opacos). O material orgânico amorfo mostra-se presente em praticamente toda a seção em pouca proporção, de forma dispersa com poucos níveis globosos e com indicações de oxidações; sugerindo ambientes rasos de sedimentação. Em termos palinológicos a associação é composta por esporos, grãos de pólen, algas, e elementos do paleomicroplâncton marinho (palinoforaminíferos e dinoflagelados). Entretanto, os esporos e grãos de pólen, especialmente os do gênero Classopollis (cuja presença indica um ambiente com clima árido a semiárido à época da deposição), são os grupos predominantes. Com base na palinologia, apesar da não detecção da passagem Aptiano-Albiano, foi possível atribuir a idade neoaptiana para a Formação Muribeca e eoalbiana para a Formação Riachuelo, na área de estudo. A presença de dinoflagelados e palinoforaminíferos na porção intermediária da seção, comprova a influência marinha à época da deposição, aqui interpretadas como sendo as primeiras incursões marinhas ocorridas no final do Aptiano. Com base nos resultados qualitativos e quantitativos do querogênio, foram caracterizar duas palinofácies, que diferem entre si pela ausência de fluorescência; maior grau de oxidação e maiores valores percentuais de COT. Os resultados de COT mostram valores até 1,65%, sugerindo a presença de níveis com bom potencial de geração de hidrocarbonetos. Os dados de Pirólise Rock-Eval apontam para o querogênio do tipo IV, adequado à formação de gás seco. O Índice de Hidrogênio (IH) apresenta valores entre 0,59 e 164,85 mg HC/g COT, mostrando um potencial gerador de gás, corroborando assim com o tipo de querogênio diagnosticado. Os dados de ICE mostram que o material orgânico se encontra próximo da janela de geração em concordância com os dados de Tmáx que apresentam valores próximos a 432°C.

Palavras-chaves: Bacia de Sergipe-Alagoas. Palinofácies. Geoquímica Orgânica. Hidrocarbonetos.

ABSTRACT

FERREIRA, Daniel Antonio Peçanha de Martino. *Organo-geological and organo-geochemical characterization of the sediments of the Muribeca and Riachuelo Formations, Lower Cretaceous of the Sergipe-Alagoas Basin*. 2018. 86 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The data presented in this dissertation discusses the results obtained with the organo-chemical and organopalinological integrated data, carried out in 23 core samples of shales and carbonates from the 9-PEO-12-SE well located in the southern portion of the Sergipe-Alagoas Basin, on shore portion. It was sought to characterize the particulate organic content, regarding the preservation state and thermal maturation and to evaluate the redox conditions. The results of light microscopy and fluorescence microscopy analysis indicate that the organic matter is dominated by elements of allochthonous origin, mainly represented by the phytoclasts group (opaque and non-opaque). The amorphous organic matter is present in practically the entire section in a small proportion, in a dispersed manner with few globose levels with oxidation indications, suggesting shallow sedimentation environments. In palynological terms, spores, pollen grains, algae and paleomicroplankton elements (dinoflagellate and palynoforaminifers). However, spores and pollen grains, especially those of the genus Classopollis (whose presence indicates an environment with arid to semi-arid climate at the deposition time) are the predominant groups. The presence of dinoflagellate and palynoforaminifers in the intermediate portion of the section proves the marine influence at the time of the deposition, here interpreted as a being the first marine incursions occurred at the end of Aptian. Based on the qualitative and quantitative kerogen results, it was possible to characterize two palynofacies, which differ from one another due to the absence of fluorescence; higher degree of oxidation and higher percentage values of TOC. The TOC results show values up to 1.65%, suggesting the presence of levels with good potential for hydrocarbon generation. The pyrolysis data indicate kerogen type IV, suitable for the generation of dry gas. The Hydrogen Index (HI) present values between 0.59 and 164.85 mg HC / g TOC, showing a potential gas generator, thus corroborating with the type of kerogen diagnosed. The ICE data show that the organic matter is near to the generation window in agreement with the Tmax data that show with values close to 432°C.

Keywords: Sergipe-Alagoas Basin. Palynofacies. Organic Geochemistry. Hydrocarbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa de localização da Bacia de Sergipe-Alagoas..... 15
Figura 2 – Ruptura do Supercontinente Gondwana e o desenvolvimento do rifte do Atlântico Sul com a deriva continental ocorrida entre os continentes da América do Sul e África..... 17
Figura 3 – Arcabouço Estrutural da Bacia de Sergipe-Alagoas, suas principais feições estruturais e compartimentos tectônicos..... 19
Figura 4 – Seção geológica esquemática da Sub-bacia de Sergipe..... 20
Figura 5 – Carta Estratigráfica Sub-bacia de Sergipe..... 25
Figura 6 – Seção geológica do Campo de Pilar..... 27
Figura 7 – Seção geológica do Campo de Carmópolis..... 28
Figura 8 – Localização do Poço 9-PEO-12-SE..... 29
Figura 9 – Perfil do poço 9-PEO-12-SE com os pontos de amostragem para análises palinológicas, palinofácies e geoquímica orgânica (COT/S e Pirólise)..... 30
Figura 10 – Fluxograma das etapas de preparação das amostras para análises palinológicas e palinofaciológicas..... 32
Figura 11 – Etapas da preparação das amostras para COT e Pirólise Rock-Eval..... 33
Figura 12 – Balança de pesagem de rocha pulverizada..... 34
Figura 13 – Amostras sendo lavadas com água fria e HCl..... 34
Figura 14 – Amostras em banho de luz..... 35
Figura 15 – Processo de elaboração das amostras e obtenção dos dados percentuais de COT – LECO SC-444..... 36
Figura 16 – Escala de 1.0 a 10, com a variação do Índice de Coloração de Esporos (ICE) – Robertson Research Limited..... 37
Gráfico 1 – Diagrama do tipo “Van Krevelen” identificando os tipos de querogênio..... 39
Figura 17 – Fluxograma de análises em mcroscopia de luz branca e fluorescência..... 41
Figura 18 – Classificação dos grupos dos componentes orgânicos estruturados e não estruturados..... 44
Tabela 1 – Resultados dos dados de Carbono Orgânico Total e Enxofre..... 45
Tabela 2 – Resultado das amostras selecionadas para Pirólise de Rock-Eval..... 46
Gráfico 2 – Diagrama do tipo “Van Krevelen” mostrando os resultados obtidos..... 47

Figura 19 – Gráfico com os valores de COT, S2 IH, IO e Tmáx com as respectivas palinofácies..... 48
Gráfico 3 – Gráfico de representação dos valores de ICE..... 49
Figura 20 – Representantes dos Fitoclastos..... 54
Figura 21 – Representantes do grupo dos palinomorfos..... 55
Figura 22 – Fotomicrografia de matéria orgânica amorfa e resina em luz branca transmitida (esquerda) e fluorescência (direita)..... 56
Figura 23 – Distribuição entre os grupos de querogênio. (MOA, Fitoclastos e Palinomorfos). Em destaque profundidade onde foram encontrados os dinoflagelados e palinoforaminíferos..... 57
Gráfico 4 – Gráfico Ternário mostrando o predomínio do material alóctone na seção estudada..... 58
Figura 24 – Fotomicrografia da matéria orgânica amorfa da amostra 9-PEO-12-SE, profundidades 366,8m 630,0m..... 59
Figura 25 – Fotomicrografia da matéria orgânica amorfa da amostra mostrando ausência de fluorescência - 9-PEO-12-SE, profundidade 581,0m..... 60
Figura 26 – Distribuição das palinofácies ao longo da seção. Em destaque profundidade onde foram encontrados os dinoflagelados e palinoforaminíferos..... 61
Figura 27 – Tabela de distribuição de formas diagnósticas de idade e ambiente identificadas..... 64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CO_2	Dióxido de Carbono
COT	Carbono Orgânico Total
E	Leste
HCl	Ácido Clorídrico
H	Hidrogênio
ICE	Índice de Coloração dos Esporos
IH	Índice de Hidrogênio
IO	Índice de Oxigênio
MOA	Matéria Orgânica Amorfa
NE	Nordeste
NNE	Norte-Nordeste
N	Norte
NW	Noroeste
O	Oxigênio
RI	Resíduo Insolúvel
S1	Quantidade de Hidrocarbonetos Livres
S2	Quantidade de Hidrocarbonetos Gerados
S3	Quantidade de Dióxido de Carbono
S	Enxofre
SE	Sudeste
SO_2	Dióxido de Enxofre
S	Sul
SW	Sudoeste
Tmáx	Temperatura de geração máxima de hidrocarbonetos obtida na Pirólise de Rock –Eval em °C
W	Oeste

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	12
1	**BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS**	14
1.1	**Introdução**	14
1.2	**Localização**	15
1.3	**Evolução Tectono-Sedimentar**	16
1.4	**Arcabouço Estrutural**	18
1.5	**Evolução Tectono-Estratigráfica**	20
1.5.1	Estratigrafia Sedimentar	21
1.5.1.1	Sinéclise Paleozóica	21
1.5.1.2	Pré-Rifte	22
1.5.1.3	Rifte	22
1.5.1.4	Transicional	23
1.5.1.5	Drifte	24
1.5.2	Breve Histórico sobre a Exploração Petrolífera da Bacia de Sergipe – Alagoas	25
1.5.2.1	Sistema Barra de Itiúba-Coqueiro Seco	26
1.5.2.2	Sistema Muribeca (Aptiano)	27
1.5.2.3	Sistema Calumbi (Neocretáceo-Terciário)	28
2	**MATERIAL E MÉTODOS**	29
2.1	**Seleção e Preparação da Amostra**	29
2.1.1	Procedimentos Laboratoriais	31
2.2	**Preparação das Amostras Palinológicas e Palinofaciológicas**	31
2.3	**Preparação das Amostras para Carbono Orgânico Total e Enxofre**	32
2.4	**Preparação das Amostras para Pirólise de Rock-Eval**	36
2.5	**Análise de ICE (Índice de Coloração dos Esporos)**	37
2.6	**Tipos de Querogênio**	37
2.7	**Análise de Microscopia em luz branca transmitida e fluorescência**	39
2.7.1	Microscopia de luz branca	40
2.7.2	Microscopia em fluorescência	40
2.8	**Estudo de Palinofácies**	41
2.8.1	Grupo da Matéria Orgânica Amorfa	42
2.8.2	Grupo dos Palinomorfos	42

2.8.3 Grupo dos Fitoclastos..... 43
3 **RESULTADOS E DISCUSSÕES**..... 45
3.1 **Geoquímica Orgânica (COT e Pirólise de Rock-Eval)**..... 45
3.2 **Índice de Coloração dos Esporos (ICE)**..... 49
3.3 **Resultados Palinofaciológicos**..... 50
3.3.1 Características Gerais da Palinoflora..... 50
3.3.1.1 Esporos..... 50
3.3.1.2 Grão de Pólen..... 51
3.3.2 Paleomicroplâncton Marinho..... 52
3.4 **Resultados Palinofaciológicos**..... 52
3.4.1 Identificação do Querogênio..... 53
3.4.1.1 Grupo dos Fitoclastos..... 53
3.4.1.2 Grupo dos Palinomorfos..... 54
3.4.1.3 Matéria Orgânica Amorfa (MOA)..... 56
3.5 **Análise Quantitativa do Querogênio**..... 56
3.6 **Caracterização das Palinofácies**..... 58
4 **CONSIDERAÇÕES BIOESTRAGRÁFICAS E DE IDADE**..... 62
CONCLUSÕES..... 65
REFERÊNCIAS..... 67
ANEXO – Associação Palinofaciológica..... 73

INTRODUÇÃO

Objetivos

O principal objetivo desta dissertação foi caracterizar o conteúdo orgânico disperso contido em estratos pertencentes às formações Riachuelo e Muribeca da porção onshore da Bacia de Sergipe-Alagoas na região sul do Estado de Sergipe quanto ao seu potencial gerador de hidrocarbonetos e posicionar temporal e ambientalmente a seção através do reconhecimento de palinomorfos diagnósticos de idade e ambiente.

Neste contexto estão inseridos os seguintes tópicos de estudo:

a) Identificação dos tipos e do estado de preservação do conteúdo orgânico dispersos nos sedimentos;
b) Classificação do tipo do querogênio;
c) Determinação dos valores percentuais de COT e enxofre;
d) Obtenção de dados de Pirólise Rock –Eval;
e) Determinação o Índice de Maturação Térmica da matéria orgânica através das análises de T-máx e ICE;
f) Caracterização e individualização das diferentes palinofácies presentes ao longo seção;
g) Posicionamento palinoestratigráfico.

Justificativa da Dissertação

A Bacia de Sergipe–Alagoas está inserida no mesmo contexto que as demais bacias prolíficas da margem leste do Brasil, formadas durante a evolução do Rifte ligado à abertura do Atlântico Sul.

As amostras selecionadas para a pesquisa pertencem ao membro Angico (Formação Riachuelo) e aos membros Carmópolis e Ibura (Formação Muribeca) os quais estão inseridos no sistema petrolífero Muribeca que tem como rocha geradora os folhelhos pretos aptianos do Membro Ibura, que é representado também por evaporitos e carbonatos microbiais.

Nas últimas décadas às seções sedimentares eocretáceas das bacias marginais têm sido objeto de intensa investigação exploratória, tendo em vista seu alto potencial gerador de hidrocarbonetos. Entretanto ainda persistem problemas no reconhecimento dos estágios termais de maturação e potencial gerador dessas rochas ricas em matéria orgânica. Ademais,

são poucas as informações divulgadas na comunidade científica e, em especial, as pesquisas envolvendo a geoquímica orgânica e de palinofácies.

A caracterização de rochas geradoras de hidrocarbonetos é a ferramenta essencial para a avaliação dos riscos exploratórios, uma vez que a ocorrência de intervalos ricos em matéria orgânica é um pré-requisito básico para formação de acumulações econômicas de óleo ou gás.

Ademais se depreende dos dados de literatura (Mendes, 1994; Dias, 2005; Campos Neto *et al.*, 2007) que ainda persistem vários níveis com excelentes indícios de serem geradores em potencial que ainda não foram devidamente investigados.

1 **BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS**

1.1 **Introdução**

A Bacia de Sergipe–Alagoas é uma das muitas bacias de margem continental formadas durante o processo de abertura do Oceano Atlântico Sul no Mesozoico. Tradicionalmente, desde sua primeira revisão litoestratigráfica por Schaller (1969), a Bacia de Sergipe-Alagoas foi tratada como uma bacia única (Lana, 1985; Feijó, 1994). Entretanto, a partir da década de 90, com base em dados estruturais e estratigráficos (Feijó e Vieira, 1990 e Feijó, 1992) importantes diferenças intrabacinais permitiram a individualização em duas sub-bacias, a saber: Sub-bacia de Sergipe e Sub-bacia de Alagoas.

O presente trabalho segue a proposta estratigráfica da Bacia de Campos Neto *et al.* (2007), que apesar de apresentar colunas estratigráficas distintas para representar as sub-bacias de Sergipe e de Alagoas, trata a Bacia de Sergipe-Alagoas como uma única bacia.

A área em estudo situa-se na Sub-bacia de Sergipe, que dentre as bacias marginais brasileiras, é a que apresenta a mais completa sucessão estratigráfica, estando representados depósitos de todos os estágios evolutivos das bacias-rifte brasileiras, a saber: Sinéclise, Pré-Rifte, Rifte, Transicional e Drifte (Ponte & Asmus, 1976; Asmus & Carvalho, 1978; Ojeda, 1982).

De um modo geral, os preenchimentos Neopaleozoico e Jurássico apresentam grande similaridade ao longo das duas sub-bacias. A seção do Cretáceo Inferior está bem mais desenvolvida na sub-bacia de Alagoas e as seções do Cretáceo Superior e Terciário tem representatividade maior na Sub-bacia de Sergipe. O limite entre as duas bacias é marcado pela feição positiva denominada Alto de Jaboatã–Penedo.

Os estratos iniciais da fase de Sinéclise são datados como de idade Carbonífero Superior (Pennsilvaniano) e Permiano Superior, e representam resquícios da sedimentação das bacias paleozoicas preservadas quando da ruptura continental (Campos Neto *et al.*, 2007).

Até o momento não foram registrados depósitos representativos do Triássico e do Jurássico Inferior a médio.

Assim, após expressiva discordância, caracterizada pela ausência de estratos de idades entre o Permiano terminal e parte do Jurássico Superior, e já na fase Pré-Rifte ocorreu a retomada da deposição no tempo Neojurássico-Eocretáceo basal.

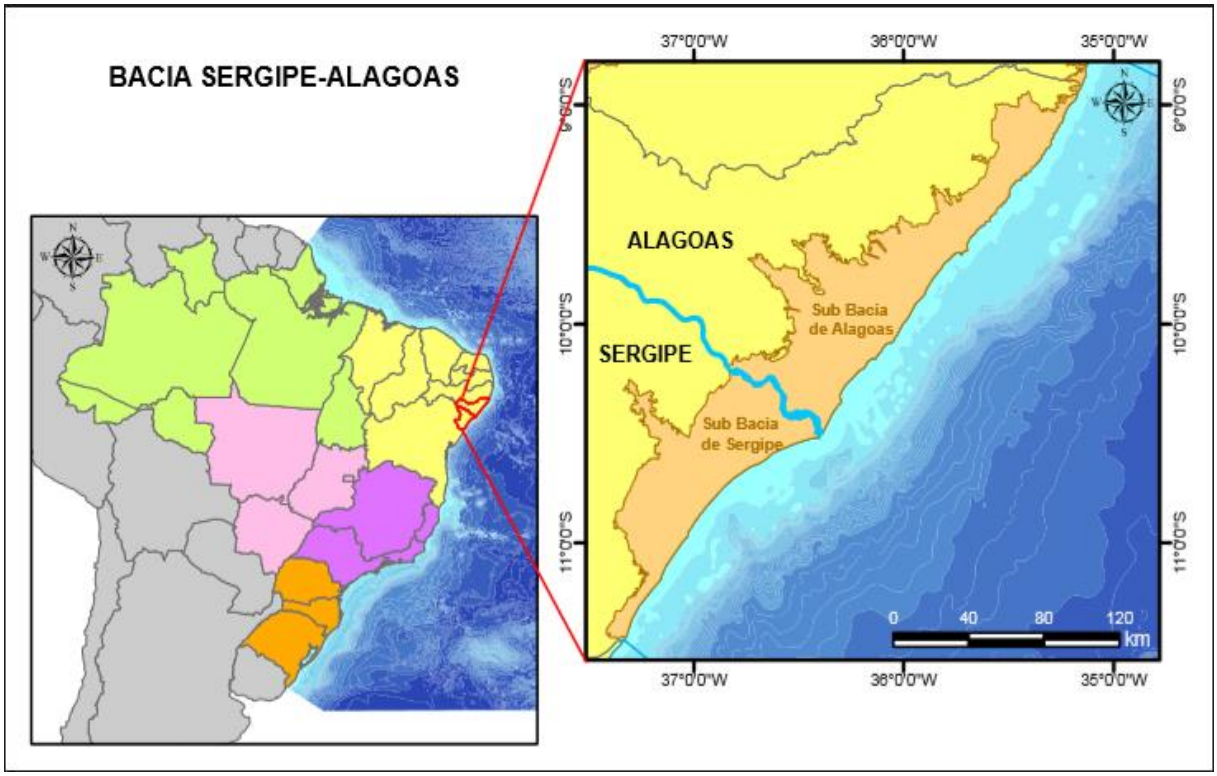
De acordo com Campos Neto *et al.* (2007), a partir do Neo-Berriasiano a bacia começou a sofrer os reflexos da abertura do oceano Atlântico Sul, desenvolvendo a Fase Rifte que perdurou até o Aptiano médio, quando passou a ter um caráter transicional. Contudo do Aptiano médio até o recente desenvolveu-se para uma bacia de margem passiva.

1.2 **Localização**

A Bacia de Sergipe–Alagoas localiza-se na margem continental do nordeste brasileiro, abrangendo partes dos estados de Sergipe, Alagoas e uma pequena porção de Pernambuco, entre os paralelos 09° e 11°30’ (Figura 1). Possui forma alongada de direção NE-SW, abrangendo uma área de aproximadamente 45.760 km2, sendo 13.000 km2 na porção emersa e 32.760 km2, na porção submersa (Aquino & Lana 1990).

Limita-se a nordeste com a Bacia de Pernambuco–Paraíba, pelo Alto de Maragogipe. Ao Sul com a Bacia de Jacuípe pelo sistema de Falhas Vaza–Barris. É subdividida pelo Alto de Japoatã / Penedo nas sub-bacias de Sergipe e Alagoas.

Figura 1- Mapa de localização da Bacia de Sergipe-Alagoas



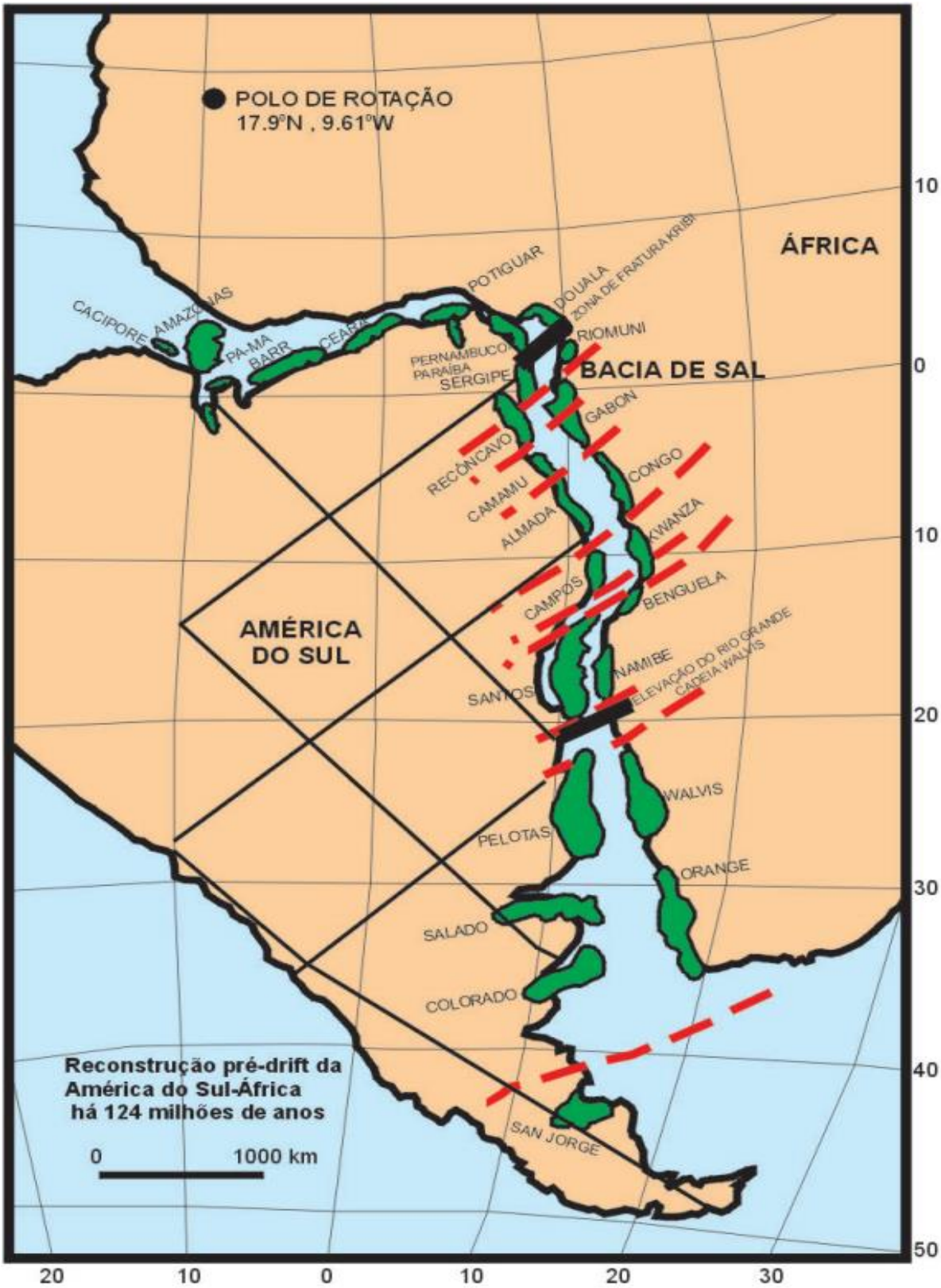
Fonte: ANP 2018

1.3 **Evolução Tectono-Sedimentar**

Em termos gerais a evolução Tectono–Sedimentar da Bacia de Sergipe–Alagoas é similar à das demais bacias da margem leste brasileira, desenvolvidas em função da ruptura e deriva continental entre as placas da África e América do Sul. Os quatro estágios básicos, diferenciados por sua sedimentação e estilo tectônico próprio, são reconhecidos: Pré-Rifte, Rifte, Transicional e Pós-Rifte (Aquino & Lana, 1990).

A orogênese ocorrida do Pré–Cambriano ao Eopaleozoico sucedeu-se por uma fase de sedimentação intracratônica nas bacias sedimentares brasileiras com vários ciclos deposicionais (Milani & Zalán, 1999; Milani & Thomaz Filho, 2000). Estas bacias foram afetadas pela quebra do supercontinente Gondwana no Mesozoico, gerando feições extensionais de riftes superpostos aos sedimentos depositados anteriormente, como por exemplo, na Bacia de Sergipe–Alagoas (Figura 2), e cobertos, em parte, por derrames basálticos ocorridos na abertura do Atlântico Sul (Mizusaki *et al.*, 2002). Os riftes da margem continental brasileira, incluindo a Bacia de Sergipe-Alagoas, formaram-se por mecanismos extensionais datados do Neojurássico ao Eocretáceo (Asmus & Porto, 1980; Asmus & Baisch, 1983; Szatmari *et al.*, 1985; Chang *et al.*, ,1992).

Figura 2 - Ruptura do Supercontinente Gondwana e o desenvolvimento do rifte do Atlântico Sul com a deriva continental ocorrida entre os continentes da América do Sul e África



Fonte: Bizzi *et al.*,2003

1.4 **Arcabouço Estrutural**

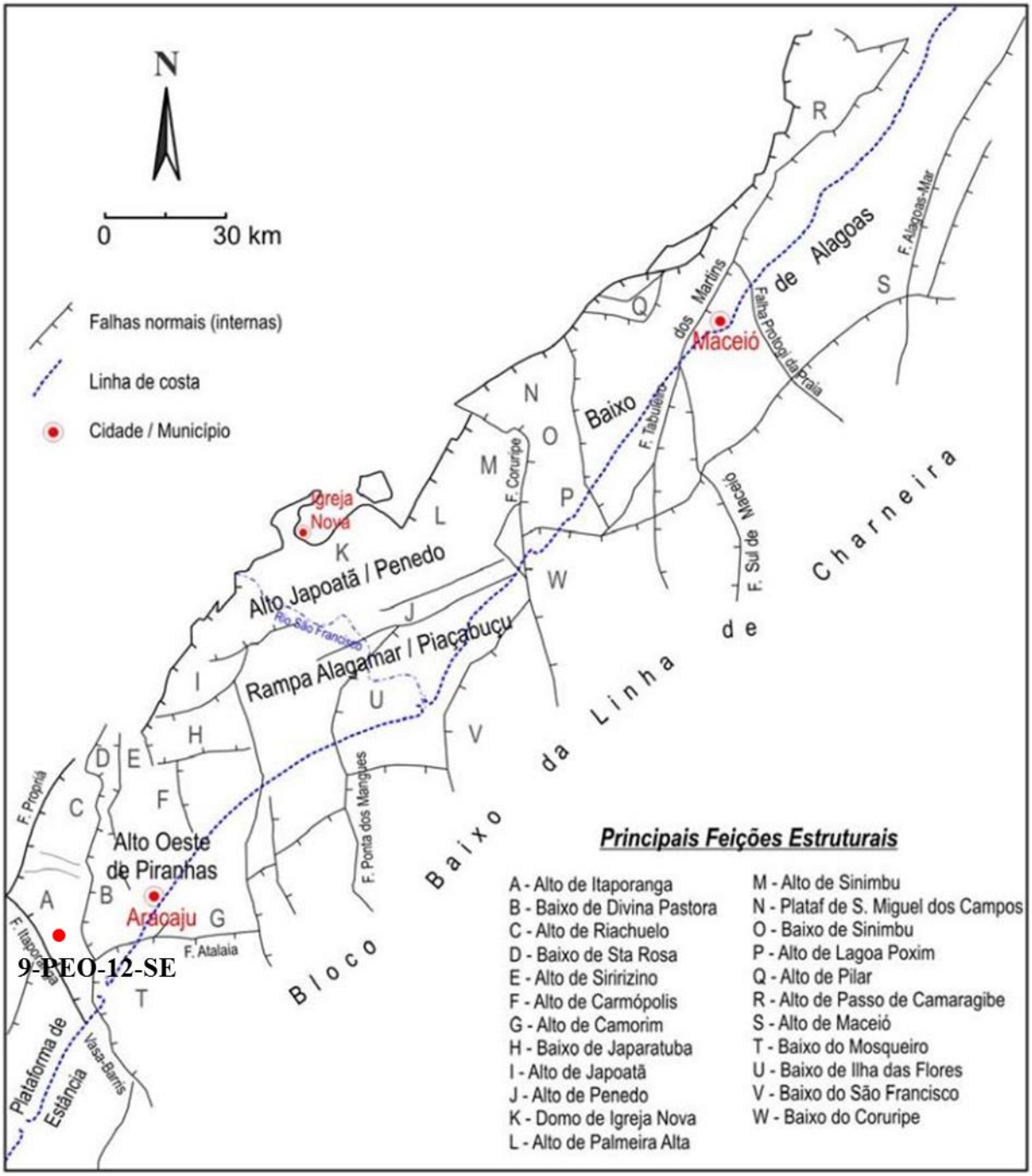
De acordo com Falkenhein *et al.* (1986) durante o estágio rifte, o arcabouço estrutural da Bacia de Sergipe-Alagoas pode ser definido por falhas de direção NE-SW, N-S, E-W e ainda NW-SE, consideradas como falhas normais ou de componente predominantemente normal (Figura 3). Dentre todas essas direções a NE-SW é a mais evidente, pois mostram os alinhamentos estruturais gerados pelo Cinturão Granulítico Atlântico na porção sul da bacia (Souza-Lima, 2006) e estão relacionadas a conglomerados sintectônicos, como as falhas na atual borda da bacia (Ojeda & Fugita, 1974).

As falhas de direção N-S são consideradas falhas de grande rejeito de componente predominantemente normal, evidenciadas nos grupos Igreja Nova, Perucaba e Coruripe na sub-bacia de Sergipe, além da Formação Maceió na sub-bacia de Alagoas (Ojeda & Fugita, 1974). Estas falhas, juntamente com as de direção E-W correspondem às direções dos esforços distensivos ocorridos durante o rifteamento oblíquo da bacia, sendo relacionadas ao falhamentos normal e transcorrente, respectivamente (Souza-Lima, 2006), e contemporâneos à formação da Zona de Transferência de Sergipe.

As falhas de direção NW-SE deslocam algumas falhas NE-SW. Levando a acreditar que as falhas de direção NE-SW se desenvolveram simultaneamente ou tardiamente (Ojeda & Fugita, 1974) com relação às falhas NW-SE.

Sendo assim, as falhas de direção NE-SW foram controladas pela reativação de zonas de cisalhamento transcorrente neoproterozoicas, geradas principalmente ao longo do Ciclo Brasiliano que deformou a Faixa Sergipana de orientação NW-SE (Souza-Lima, 2006).

Figura 3 - Arcabouço Estrutural da Bacia de Sergipe-Alagoas, suas principais feições estruturais e compartimentos tectônicos.



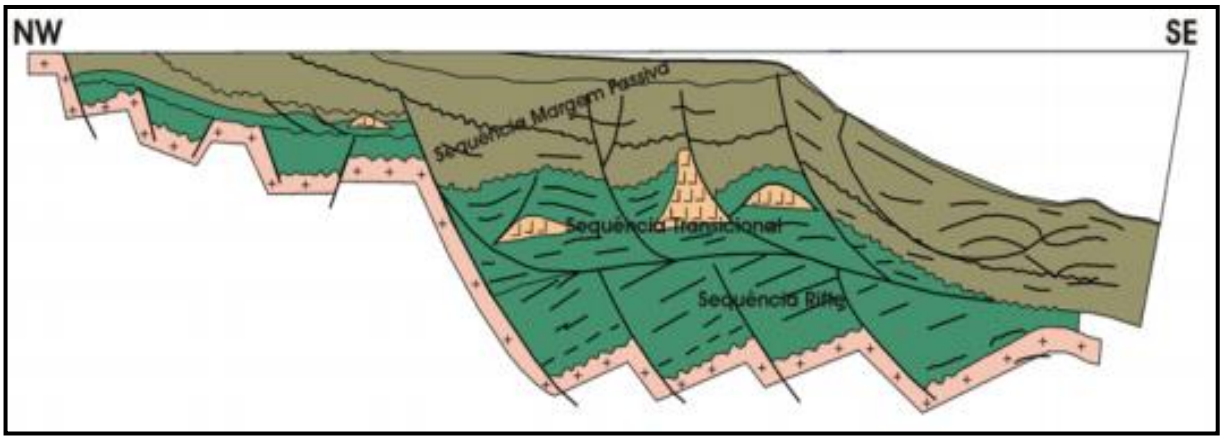
Fonte: FALKENHEIN *et al.*,1986

Os eventos de deformação pós-rifte são aqueles que afetam as rochas depositadas a partir do Albiano. Na Bacia de Sergipe-Alagoas são conhecidos pelo menos três eventos de deformação pós-rifte: a tectônica albiana, a tectônica do sal e a neotectônica, sendo esta última atuante nas unidades mais jovens da bacia como, por exemplo, a Formação Barreiras (Lima, 1987). Este período caracterizou-se pela ocorrência de uma fase distensiva com falhas

normais NW – SE e intensa erosão e discordância pós – rifte com depocentros de orientação NE, nos blocos baixos da linha de charneira. Nesta fase ocorre ainda, a reativação das falhas de borda de direção NE e NNE.

Outro evento de deformação pós-rifte amplamente conhecido na Bacia de Sergipe-Alagoas, é a tectônica do sal (Figura 4). Segundo Mohriak *et al.*, (1997) esta tectônica é responsável pela geração de falhas de movimentação do sal que são caracterizadas por falhas lístricas, de empurrão, de crescimento, domos de sal e muralhas.

Figura 4 - Seção geológica esquemática da Sub-bacia de Sergipe.



Fonte: Petrobras

1.5 **Evolução Tectono–Estratigráfica**

Entre as bacias marginais brasileiras a Bacia de Sergipe–Alagoas é a que apresenta a sucessão estratigráfica mais completa. O pacote sedimentar da bacia está relacionado a cinco estágios evolutivos (Sinéclise Paleozoica, Pré-Rifte, Rifte, Transicional e Drifte) que são diferenciados por mudanças nítidas na sedimentação e no estilo tectônico associado em função da formação do Atlântico Sul.

Segundo Kosin *et al.*, 2004, a Bacia de Sergipe–Alagoas engloba rochas de idades e ambientes distintos. As rochas pré-cambrianas incluem o Cráton do São Francisco, o Maciço Pernambuco–Alagoas e a Faixa Sergipana. As rochas Fanerozoicos estão localizadas nos riftes Juro–Cretáceo abortados da Bacia de Sergipe-Alagoas e também nos riftes nas bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá.

O embasamento da Bacia de Sergipe–Alagoas é formado por rochas de Cráton do São Francisco, do Maciço Pernambuco–Alagoas e Faixa Sergipana. O Cráton do São Francisco é constituído por rochas metamórficas formadas durante o Neoarqueano, que foram metamorfizadas durante a orogenia Transamazônica no Paleoproterozoico. Por sua vez o Maciço Pernambuco–Alagoas é composto por rochas metassedimetares e metavulcano – sedimentares, de idade mesoproterozoica, intrudidas por granitoides Neoproterozoicos.

A Faixa Sergipana constitui um cinturão metavulcano–sedimentar de idade neoproterozóica, intrudido por granitoides sin- a pós-tectônicos (D'El-Rey Silva & Mcclay, 1995; Kosin *et al.*, 2004; Silva Filho *et al.*, 2003, Oliveira *et al.*, 2006). Esta Faixa delimita-se ao norte pelo Maciço Pernambuco–Alagoas e ao sul pelo Cráton do São Francisco. A porção leste da Faixa Sergipana serve como embasamento para a Bacia de Sergipe - Alagoas.

1.5.1 Estratigrafia Sedimentar

Adota-se aqui a evolução estratigráfica proposta por Campos Neto *et al.*, (2007), que subdivide os depósitos da Bacia de Sergipe-Alagoas em cinco Supersequências: Sinéclise Paleozoica, Pré-Rifte, Rifte, Transicional e Drifte (Figura 5).

1.5.1.1 Sinéclise Paleozoica

Sobre o embasamento pré-cambriano foram depositados em condições intracratônicas os sedimentos que compõem o estágio de sinéclise paleozoica. Estes sedimentos formam o Grupo Igreja Nova que por sua vez é composto pelas formações Batinga (Neocarbonífero) e Aracaré (Permiano). A Formação Batinga, depositada em ambiente glácio–marinho (Schaller, 1969), inicialmente foi sub-dividida nos membros Mulungu, Atalaia e Boacica. Campos Neto *et al.*, (2007), engloba os estratos do antigo Membro Atalaia no estágio Pré-Rifte e pertencente a Formação Candeeiro de idade Juro-Cretácea.

Atualmente a Formação Batinga é composta pelos Membros Mulungu, conglomerados e diamictitos com seixos e matacões de rochas ígneas e metamórficas, e Boacica, caraterizado por siltitos laminados.

Por sua vez a Formação Aracaré é representada por uma intercalação de arenitos, folhehos e calcáreos, depositados em um ambiente desértico, litorâneo e deltaico, sob a influência eólica e de ondas.

1.5.1.2 Pré-Rifte

O estágio Pré–Rifte teve seu início no Neojurássico e foi depositado sob condições de estabilidade tectônica. Os sedimentos depositados correspondem à sequência Continental de Asmus & Baisch (1983).

Limita-se com o estágio de sinéclise paleozoica por uma discordância angular e é composta pelas formações Candeeiro, Bananeiras e Serraria, representantes do Grupo Perucaba.

A Formação Candeeiro é composta por arenitos provavelmente depositados por sistemas fluviais entrelaçados, é sucedida pela Formação Bananeiras, representada por folhelhos e argilitos depositados em ambiente lacustre, que estão sobrepostos aos quartzo-arenito da Formação Serraria que foram depositados por rios entrelaçados com retrabalhamento eólico.

1.5.1.3 Rifte

Segundo Campos Neto *et al.*, (2007) a Fase Rifte se iniciou no Andar Rio da Serra, com a instalação de um sistema lacustre–deltaico da Formação Feliz Deserto, constituída por uma sucessão de folhelhos esverdeados intercalados com arenitos. Corresponde ao estágio de subsidência mecânica da bacia. Discordantemente se sobrepõe a porção basal da Formação Barra de Itiúba.

Ainda na Fase Rifte, representada por uma sedimentação continental e marinho restrito depositaram-se as formações Barra de Itiúba (porção média-superior); Penedo; Rio Pitanga; e Coqueiro Seco que compõem a quase totalidade do Grupo Coruripe.

A Formação Barra de Itiúba é composta por intercalações de folhelhos, arenitos e calcilutitos depositados por um sistema deltaico em ambiente lacustre. Devido à presença de ostracodes não marinhos teve sua idade interpretada como eocretácea.

A Formação Barra de Itiúba interdigita-se com a Formação Penedo, que por sua vez é constituída por arenitos, depositados em sistemas fluviais entrelaçados, com retrabalhamento eólico.

A Formação Coqueiro Seco é constituída por arenitos, por vezes conglomeráticos, depositados por deltas e folhelhos sílticos de sedimentação lacustre, tendo contatos concordantes tanto com a Formação Penedo (sobreposta) quanto com a Formação Maceió (sotoposta).

A Formação Rio Pitanga representa as fácies proximais da Fase Rifte, sendo caracterizada por conglomerados, depositados em sistemas de leques aluviais associados aos falhamentos da borda da bacia.

Finalizando o estágio Rifte, temos os litotipos da Formação Maceió, com depósitos siliciclásticos provenientes de leques aluviais e sistemas turbidíticos lacustres, que a partir do aptiano sofreram influência marinha. Os contatos, superior (Riachuelo) e inferior (Coqueiro Seco) são concordantes.

A partir do Eoaptiano o regime da bacia passa a ter uma subsidência basicamente termal, ocasionando uma diminuição na taxa de sedimentação. Neste momento ocorre às primeiras incursões marinhas, ilustrando a passagem de um ambiente continental para marinho com severas condições de aridez, correspondente aos evaporitos Paripuera. (Feijó, 1994).

1.5.1.4 Transicional

No Neoaptiano, sob condições tectônicas mais estáveis (Ojeda, 1982) e associadas a um clima árido, depositaram-se, discordantemente, os estratos da Formação Muribeca composta por sedimentos clásticos, evaporitos e carbonatos de baixa energia; ainda como parte superior do Grupo Coruripe.

A Formação Muribeca é composta pelo Membro Carmópolis, basal, formado por sedimentos siliciclásticos grossos, representados por conglomerados intercalados com arenitos de granulometria variada; tendo ainda a presença de folhelhos e localmente a

existência de carbonatos. Sobreposto ao Membro Carmópolis depositaram-se os evaporitos, associados a carbonatos (calcarenitos e calcirruditos) microbiais e folhelhos, do Membro Ibura. O Membro Oiteirinhos, superior, constituí-se por intercalações de folhelhos e calcilutito; encerrando a fase transicional da bacia.

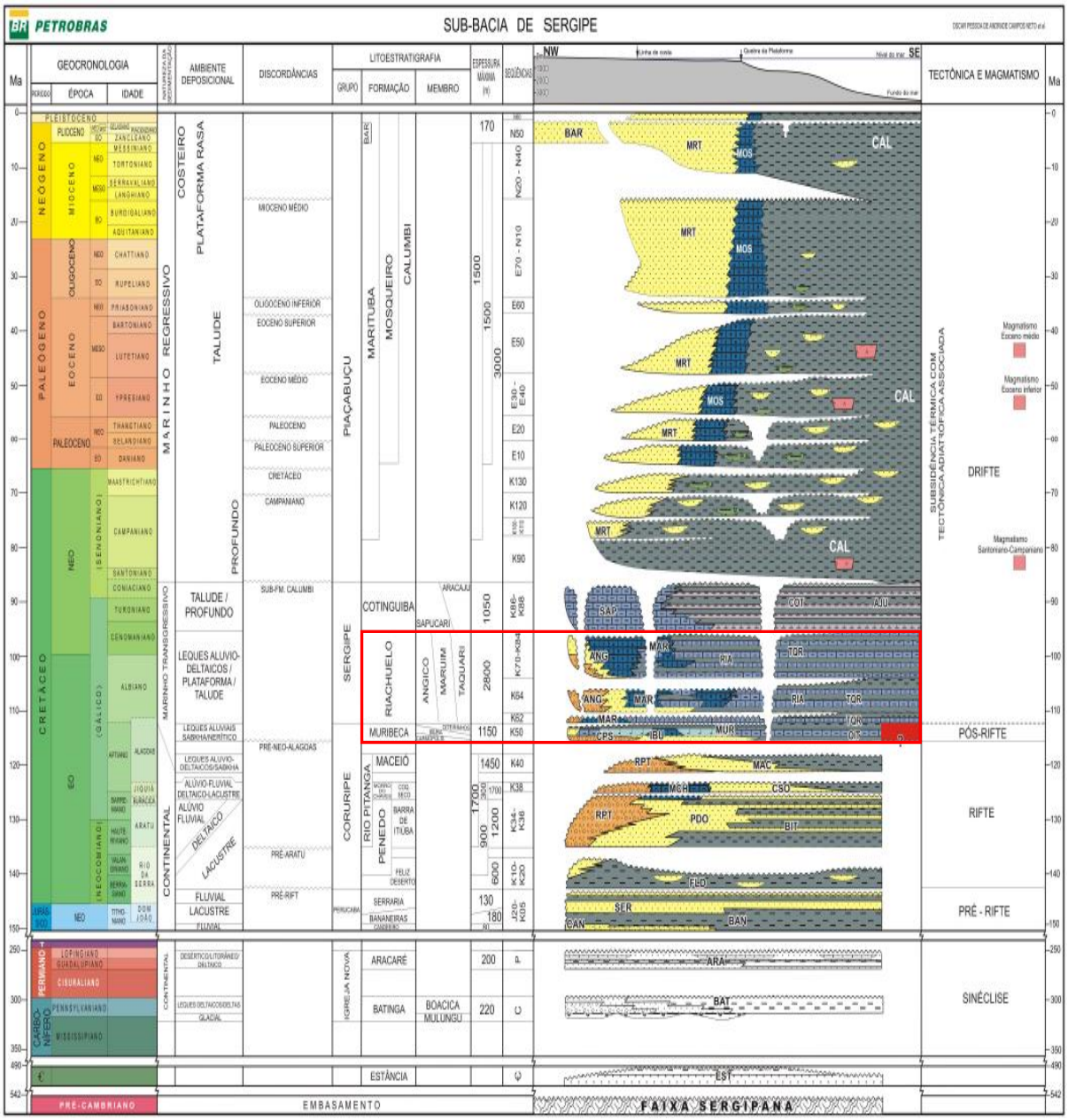
1.5.1.5 Drifte

A partir do Albiano, com a entrada do oceano, deu-se a deposição de uma plataforma carbonática seguida por uma sequência terrígena de margem passiva que correspondente à fase Drifte.

Inserido neste contexto tem-se o Grupo Sergipe, composto pelas formações Riachuelo e Contiguiba. A Formação Riachuelo (Albiano-Cenomaniano), engloba um complexo clástico–carbonático, onde é reconhecido o Membro Angico, composto por arenitos siliciclásticas e conglomerados (leques deltáicos); o Membro Maruim, representado por calcarenitos e calcirruditos (oólitos e oncólitos); e o Membro Taquari: caracterizado por uma intercalação de calcilutitos e folhelhos.

No início do Cenomaniano ocorreu uma grande transgressão marinha, que afogou os depósitos da Formação Riachuelo permitindo a deposição de calcilutitos. No Neocenomaniano até o Turoniano/Coniaciano, têm-se a Formação Cotinguiba, que é formada pelos membros: Sapucari e Aracajú. O primeiro, inferior, é composto essencialmente por calcilutitos, enquanto que o segundo, superior, é constituído por margas, folhelhos e argilitos.

Figura 5 - Carta Estratigráfica Sub-bacia de Sergipe



Fonte: Campos Neto *et al.*, 2007.

1.5.2 Breve Histórico sobre a exploração petrolífera da Bacia de Sergipe-Alagoas

De acordo com a ANP (Haeser, 2017), as atividades de exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas iniciaram-se em 1935, com levantamentos geofísicos e perfuração do poço 2AL 0001 AL, por intermédio do Conselho Nacional do Petróleo. As primeiras sondagens ocorreram na região norte do estado de Alagoas, com a primeira descoberta comercial de

petróleo ocorrendo em 1957, através do poço 1TM 0001 AL. Em 1963 foi descoberto o Campo de Carmópolis, na parte terrestre da Sub-bacia de Sergipe.

A exploração na plataforma continental teve início na Sub-bacia de Sergipe no final da década de 60, quando ocorreu a primeira descoberta comercial de óleo em toda a margem continental brasileira, através da perfuração do pioneiro 1-SES-0001A-SE, descobridor do Campo de Guaricema.

Atualmente a bacia conta com 39 campos de petróleo, sendo 36 na fase de produção e 3 na fase desenvolvimento. Desses 39 campos, 26 estão localizados na Sub-bacia de Sergipe e 13 na Sub-bacia de Alagoas, sendo 8 campos em mar e 31 campos em terra. Registram-se na Bacia de Sergipe-Alagoas 39 blocos em concessão (20 na Sub-bacia de Alagoas e 19 na Sub-bacia de Sergipe, sendo 28 na porção terrestre e 11 na sua porção marítima).

Em março de 2017 a produção diária de petróleo na Bacia de Sergipe-Alagoas (porções marítimas e terrestres) foi da ordem de 28 mil barris e a produção diária de gás natural da ordem de 3 mil m3 (ANP 2017).

A Bacia de Sergipe–Alagoas é produtora de óleo e gás em diversos plays exploratórios, com alguns sistemas petrolíferos conhecidos, sendo a maior parte destes localizadas na porção terrestre da bacia.

Entende-se por sistema petrolífero a existência e o funcionamento síncrono de 4 elementos básicos (rochas geradora matura, rochas reservatório, rochas selantes e trapas) com dois fenômenos geológicos dependentes do tempo (migração e sincronismo). (Milani *et al.*, 2001)

De acordo com a ANP, vale citar os seguintes sistemas perolíferos pertencentes a Bacia de Sergipe-Alagoas:

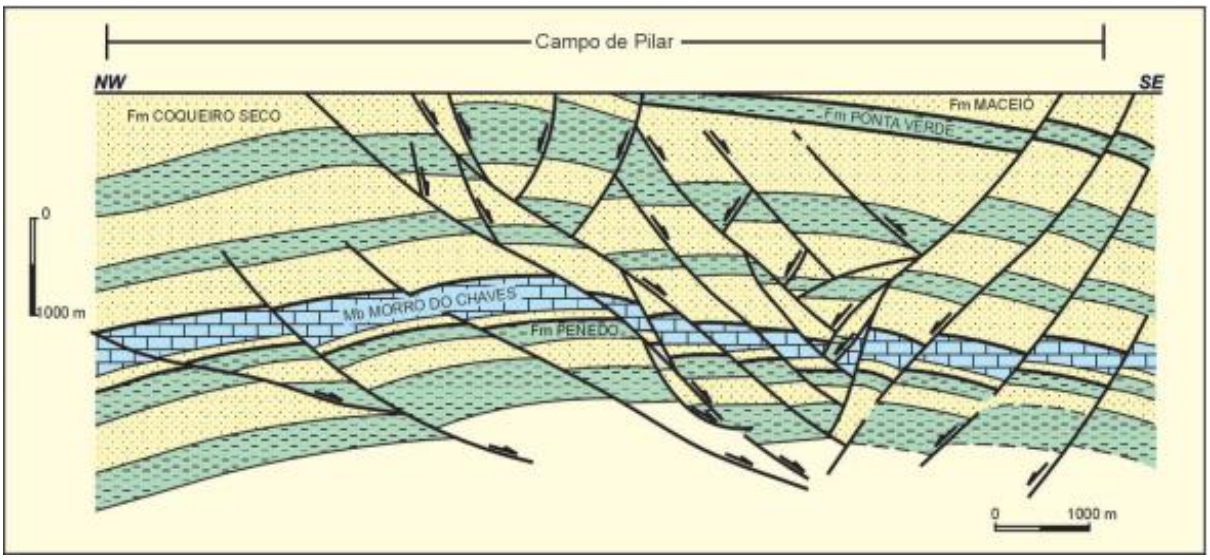
1.5.2.1 Sistema Barra de Itiúba-Coqueiro Seco

O sistema Petrolífero Barra de Itiúba-Coqueiro Seco tem como geradores os folhelhos depositados em lagos sintectônicos da fase Rifte, de idade Neocomiana a Barremiana. Apresentam querogênio do tipo I e carbono orgânico total de até 5%. A migração é secundária e se dá através do contato direto das rochas geradoras com as rochas reservatório por intermédio de falhamentos lístricos.

Os reservatórios que ocorrem nas formações Barra de Itiúba e Coqueiro Seco são compostos por arenitos deltaicos selados pelos folhelhos dessas mesmas unidades.

São representativos desse sistema petrolífero os campos de Pilar, Furado, Rio Vermelho, São Miguel dos Campos e Fazenda Pau Brasil (Figura 6).

Figura 6 - Seção geológica do Campo de Pilar.



Fonte: CPRM modificado de Borba 1998

1.5.2.2 Sistema Muribeca (Aptiano)

Apresenta como rocha geradora os folhelhos pretos de idade aptiana da Formação Muribeca, Membro Ibura. Trata-se de rochas com um conteúdo de carbono orgânico que pode alcançar 12%, geradas em ambiente marinho restrito e contendo predominantemente querogênio do tipo II.

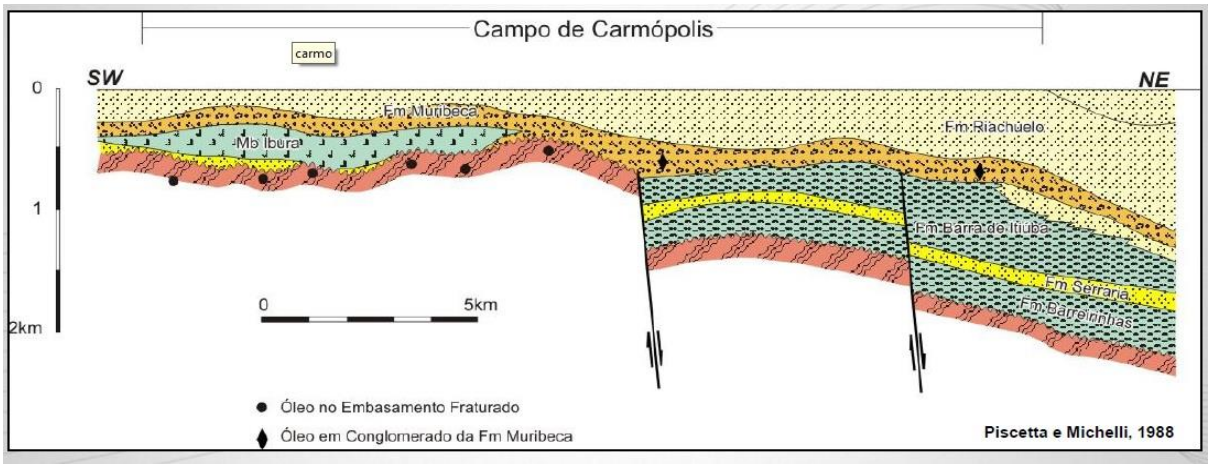
A migração de hidrocarbonetos aconteceu a partir dos grandes baixos regionais da bacia, no sentido da porção terrestre e de águas rasas, onde se situam proeminentes altos estruturais.

Os reservatórios principais, em termos de volume acumulado já descoberto, são os conglomerados da Formação Muribeca, Membro Carmópolis e o embasamento cristalino fraturado, trapeados em sistema de blocos falhados e selados por evaporitos e folhelhos aptianos. Reservatórios com petróleo Muribeca também ocorrem em depósitos arenosos

situados em outros níveis estratigráficos, tais como nas formações Serraria, Coqueiro Seco e Calumbi.

Além do Campo de Carmópolis (Figura 7), inserido dentro do sistema petrolífero Muribeca, principal campo produtor da bacia, tem ainda os campos de Camorim, Siririzinho, Riachuelo, Guaricema, Caioba, Dourado e Tabuleiro dos Martins. O material estudado está inserido dentro do sistema petrolífero Muribeca.

Figura 7 - Seção geológica do Campo de Carmópolis.



Fonte: Bizzi *et al.*, 2003 – modificado De Piscetta e Michelli, 1988

1.5.2.3 Sistema Calumbi (Neocretáceo-Terciário)

O sistema é formado pelos reservatórios turbidíticos e de plataforma da Formação Calumbi. Os hidrocarbonetos gerados nas rochas pertencentes as Formações Muribeca e Maceió, migraram por falhas formadas por halocinese e reativações da fase sin-rifte. Os campos explorados são os de Guaricema, Dourado e Piranema.

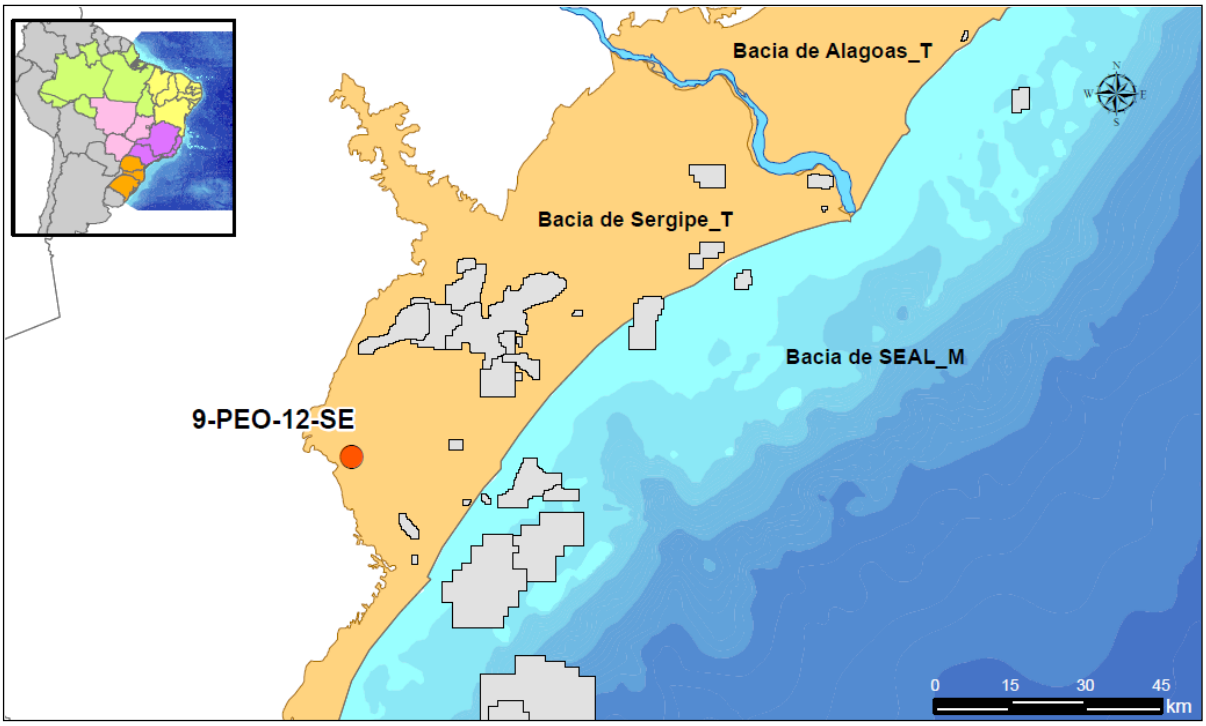
Detectaram-se ocorrências de geração em condições de profundidade de soterramento nas Formações Riachuelo (Membro Angico), Contiguiba e em intervalos de folhelhos da Formação Calumbi, entretanto, segundo Babinski & Santos 1987, tais ocorrências não são consideradas expressivas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Seleção e Preparação das Amostras

As amostras analisadas são provenientes de um furo de sondagem rasa com testemunhagem contínua, Poço 9-PEO-12-SE. Este poço situa-se na região onshore da bacia e no campo de Castanhal, no Estado de Sergipe, nas coordenadas: -10° 56’ 33.164’’ S e -37° 17’ 35.051’’ W (Sirgas 2000) (Figura 8).

Figura 8 - Localização do Poço 9-PEO-12-SE



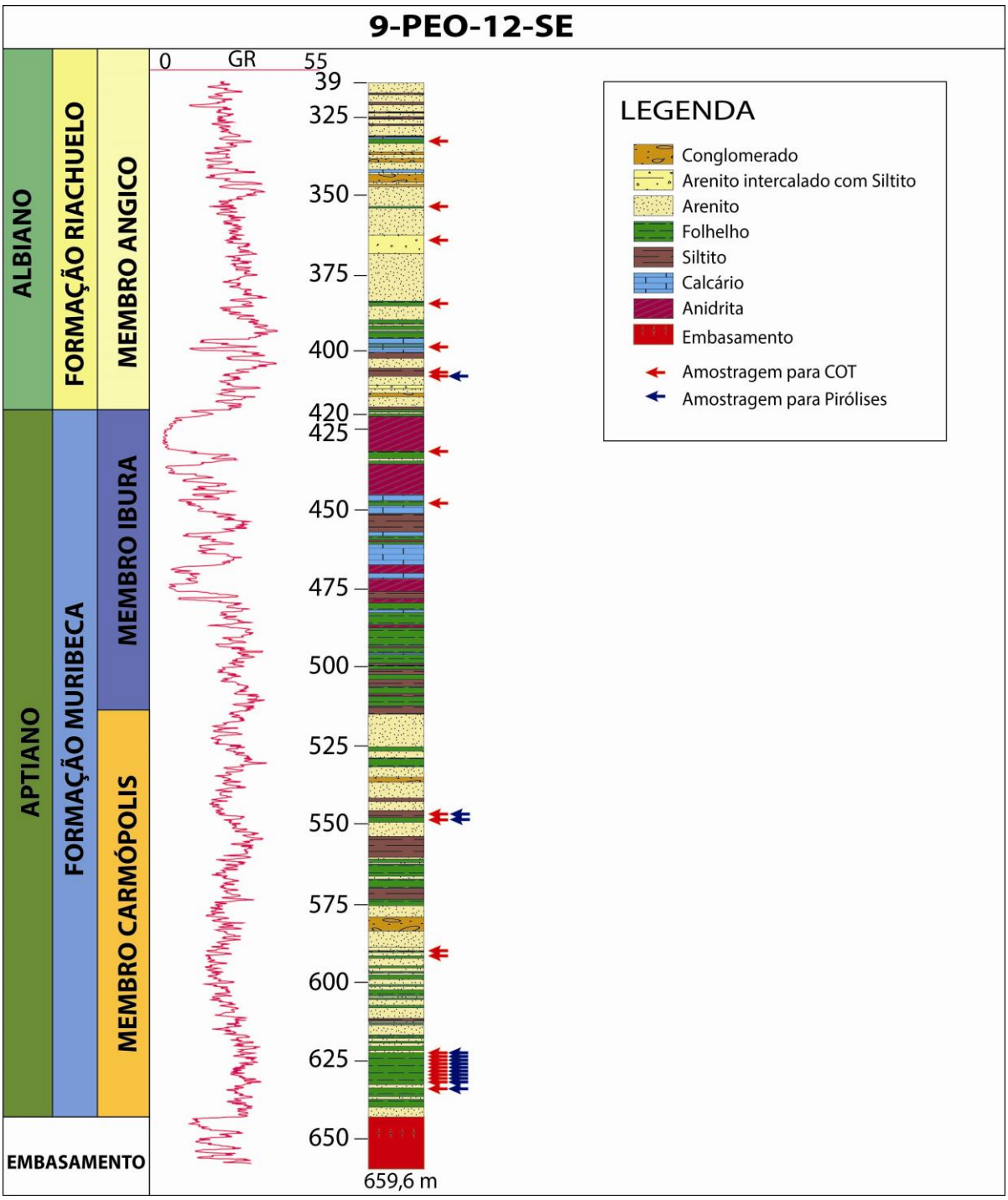
Fonte: ANP, 2018

O Poço 9-PEO-12-SE tem profundidade de 659,60 metros, englobando as formações Muribeca (Membro Carmópolis e Ibura) e Riachuelo (Membro Angico).

O intervalo entre 643,0 m e 526,0 m, corresponde à seção inferior (Membro Carmópolis) que apresenta ocorrência de intercalações entre camadas de folhelhos e camadas de arenitos e conglomerados. A seção intermediária (Membro Ibura) identificada entre o intervalo de 516,0 m a 420,0 m é composta por intercalações de evaporitos, carbonatos, folhelhos e siltitos. A seção superior (Membro Angico) tipificada entre o intervalo de 420,0 m

a superfície (39,0 m) corresponde a intercalações de camadas de arenitos com finas camadas de folhelhos, siltitos, carbonatos e conglomerados (Figura 9).

Figura 9 - Perfil do poço 9-PEO-12-SE com os pontos de amostragem para análises palinológicas, palinofácies e geoquímica orgânica (COT/S e Pirólise)



Fonte: O autor, 2018.

2.1.1 Procedimentos Laboratoriais

Foram selecionadas 23 amostras preferencialmente de granulometria fina, coloração cinza médio a escuros e ricos em matéria orgânica.

Todas as amostras foram processadas para palinologia, palinofácies e COT. As 11 (onze) amostras que apresentaram valores de COT, próximos ou acima de 1%, foram selecionadas e enviadas para análises de Pirólise Rock-Eval.

Os processamentos organogeoquímicos e organofaciológicos foram realizados nos Laboratórios de Geoquímica Orgânica (LGQM) e Palinomacerais (LBMP) da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

2.2 **Preparação das Amostras Palinológicas e Palinofaciológicas**

Na preparação química das amostras tanto para as análises palinológicas quanto palinofaciológicas, seguiu-se as etapas descritas por Antonioli *et al.*, 2018 (Figura 10).

A partir da fragmentação de aproximadamente 40 gramas de cada amostra, em tamanhos ao redor de 5,0 mm, as mesmas foram transferidas para bécheres de polipropileno, devidamente identificados para o primeiro estágio da maceração por acidificação.

O tratamento se inicia adicionando às amostras, ácido clorídrico concentrado (HCL-32%) a fim de eliminar os possíveis carbonatos. Posteriormente, as amostras foram lavadas em água destilada visando neutralizar o meio, para prosseguimento dos ataques químicos posteriores (Repete-se o processo por três vezes).

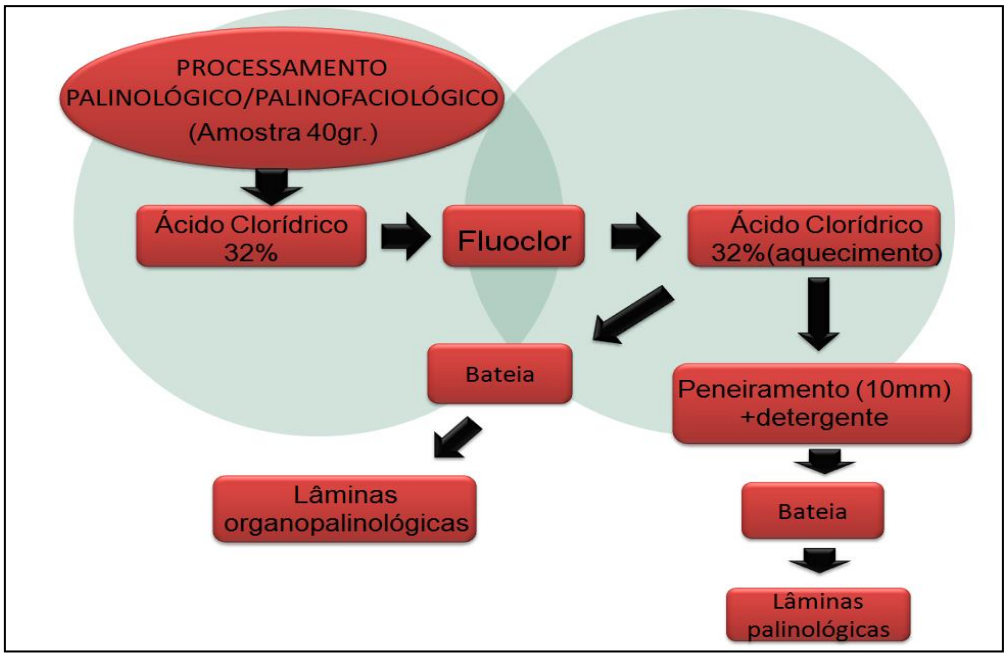
Em seguida as amostras sofreram ataques com ácido fluoclor, visando à eliminação dos silicatos (aproximadamente 100 ml ou uma quantidade suficiente para recobrir todo material), ficando em repouso por aproximadamente 24 horas. Após a neutralização das amostras com água destilada, foram adicionados aproximadamente 50 ml de HCl a 32% a quente com temperatura de 40°C por duas horas visando a remoção de cristais de fluorsilicatos que possam ter sido precipitados durante o tratamento com fluoclor.

Após a neutralização foram confeccionadas duas lâminas por resíduo, uma organopalinológica e outra palinológica. As lâminas organopalinológicas foram confeccionadas a partir do resíduo total e as palinológicas após o peneiramento do resíduo,

com peneiras de nylon de 200 µm e 10 µm, respectivamente, a fim de concentrar os palinomorfos. A preparação das lâminas foi feita a partir de "bateia" com utilização de vidro de relógio para melhor concentração do resíduo orgânico e utilizadas chapa quente com temperatura em torno de 30°C. Na colagem das lâminas aplicou-se uma gota de resina à base de xileno (Entellan- Merck) em duas gotas do resíduo final.

As leituras e análises das lâminas (palinológicas e organopalinológicas) foram obtidas através do microscópio da Carl Zeiss com fonte de luz branca transmitida e fluorescência (lâmpada de mercúrio HBO–100W), com oculares de aumento de 10X e objetivas com aumentos de 10X, 20X, 40X. As fotomicrografias foram obtidas com objetiva de 100X.

Figura 10 - Fluxograma das etapas de preparação das amostras para análises palinológicas e palinofaciológicas



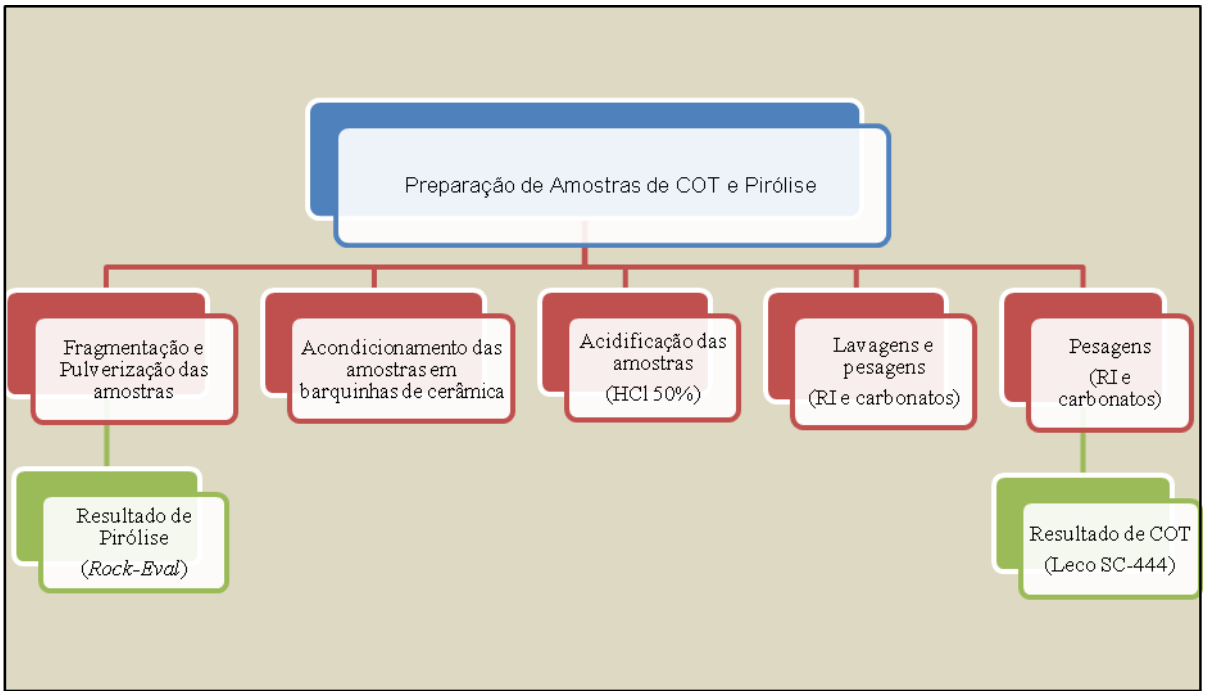
Fonte: Antonioli *et al.*, 2018.

2.3 **Preparação das amostras para Carbono Orgânico Total (COT) e Enxofre (S)**

Inicialmente as amostras passaram por processos de fragmentação e secagem em banho de luz com lâmpadas incandescente. Posteriormente, foram maceradas (pulverizadas) em graal de porcelana e colocadas em uma peneira de 80 mesh. Em seguida o material que ficou retido foi descartado e a parte mais fina que 80 mesh foi enviada para análise de carbono orgânico e enxofre total no equipamento Leco e pirólise

Rock-Eval (Figura 11).

Figura 11 - Etapas da preparação das amostras para COT e Pirólise Rock-Eval



Fonte: O autor, 2018.

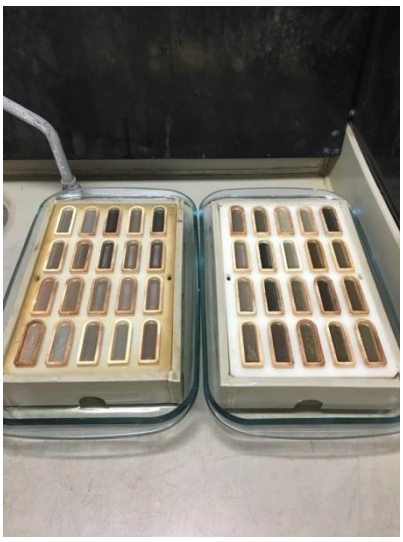
São basicamente três etapas realizadas para as referidas análises. A primeira consiste na pesagem de aproximadamente 0,25g de amostra de rocha pulverizada (< 80 mesh) em “barquinhos”de cerâmica porosos (filtrante) (Figura 12). Logo após a pesagem, as amostras foram acondicionadas em bandeja de acrílico (material que não sofre corrosão ao ataque do ácido clorídrico) e levadas à capela onde foram acidificadas com ácido clorídrico a 50% (Figura 13). Este procedimento foi realizado a frio, por um período de 24 horas, de modo a serem eliminados os carbonatos presentes nas amostras.

Figura 12 - Balança de pesagem de rocha pulverizada

Fonte: O autor, 2018.

A segunda etapa consiste na lavagem das amostras no mínimo quatro a cinco vezes: a primeira com água destilada quente (100°C) e mais três a quatro vezes com água fria, para que todos os cloretos presentes, formados durante a acidificação com HCl, sejam eliminados das amostras.

Figura 13 - Amostras sendo lavadas com água fria e HCl



Fonte: O autor, 2018.

Por fim as amostras foram secas em um banho de luz com lâmpadas incandescentes com temperatura ao redor de 80°C e novamente levadas para uma nova pesagem, para serem calculadas as quantidades de carbonatos eliminados e de resíduo insolúvel (RI) (Figura 14).

Figura 14 - Amostras em banho de luz

Fonte: O autor, 2018.

O RI é calculado da seguinte forma:

RI (%) = Peso Insolúvel x 100 / Peso Inicial da Amostra.....(1)

Utilizou-se o analisador LECO SC-444 para a obtenção dos valores percentuais de COT e S. Este equipamento não dispersivo foi projetado para medir carbono e enxofre total simultaneamente em uma grande variedade de materiais orgânicos e inorgânicos. O equipamento citado é constituído de um introdutor automático de amostras no forno de combustão, com capacidade para 36 amostras; um forno para combustão das amostras e uma unidade de medida de dióxido de carbono (CO_2) e de dióxido de enxofre (SO_2) liberados na combustão. O sistema de medida consiste em um detector de infravermelho, que mede as concentrações de dióxido de carbono assim como a de dióxido de enxofre. A quantidade medida é representativa dos teores de carbono orgânico e de enxofre presente na amostra, sendo o seu valor expresso em percentagem de peso relativo.

2.4 **Preparação das amostras para Pirólise Rock-Eval**

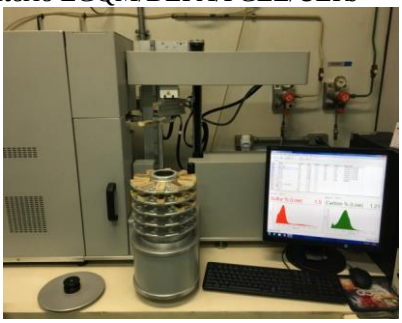
Apenas 11 (onze) amostras se revelaram adequadas para as análises de Pirólise Rock-Eval, por conter em teores de COT variando de 0,95 a 3,40 %.

A análise de Pirólise Rock-Eval corresponde ao método físico-químico mais usado para caracterizar os tipos de querogênio e também fornecer os seus respectivos potenciais de geração. Nessas análises foram adotados, basicamente, os procedimentos estabelecidos por Espitalié *et al.*, (1977).

Cerca de 100 mg das 11 (onze) amostras previamente selecionadas, foram pulverizadas e enviadas para o laboratório (LGQM) /DEPA/FGEL). No equipamento, as amostras foram aquecidas em atmosfera inerte entre 300 a 500 ºC, utilizando-se o hélio como gás carreador. Os hidrocarbonetos e o CO_2 liberados foram medidos, respectivamente, por detectores de ionização de chama e de condutividade térmica. Os resultados são expressos em mg HC/g COT e mg CO_2 / g COT.

A liberação de voláteis ocorre em três etapas, a temperaturas crescentes. Os resultados oferecem os seguintes parâmetros: hidrocarbonetos até 350 ºC, correspondendo ao pico S1 e representando os hidrocarbonetos livres na rocha, ou seja, aqueles que já foram gerados, mas ainda se encontram nos poros da rocha geradora; hidrocarbonetos produzidos pelo craqueamento térmico do querogênio entre 350 e 550 ºC, saindo como pico S2 e significando os hidrocarbonetos ainda não gerados; valores de T-máx, representando a temperatura em que ocorre a altura máxima do pico S2; dióxido de carbono liberado entre 250 e 390 ºC, representando a quantidade de oxigênio presente no querogênio (pico S3). Os dados obtidos pela análise de Pirólise Rock-Eval permitem a obtenção de informações básicas sobre o tipo e a evolução térmica da matéria orgânica (Figura 15).

Figura 15 - Processo de elaboração das amostras e obtenção dos dados percentuais de COT – LECO SC-444 - Laboratório LGQM/DEPA/FGEL/UERJ



Fonte: O autor, 2018.

2.5 **Análises de ICE (Índice de Coloração dos Esporos)**

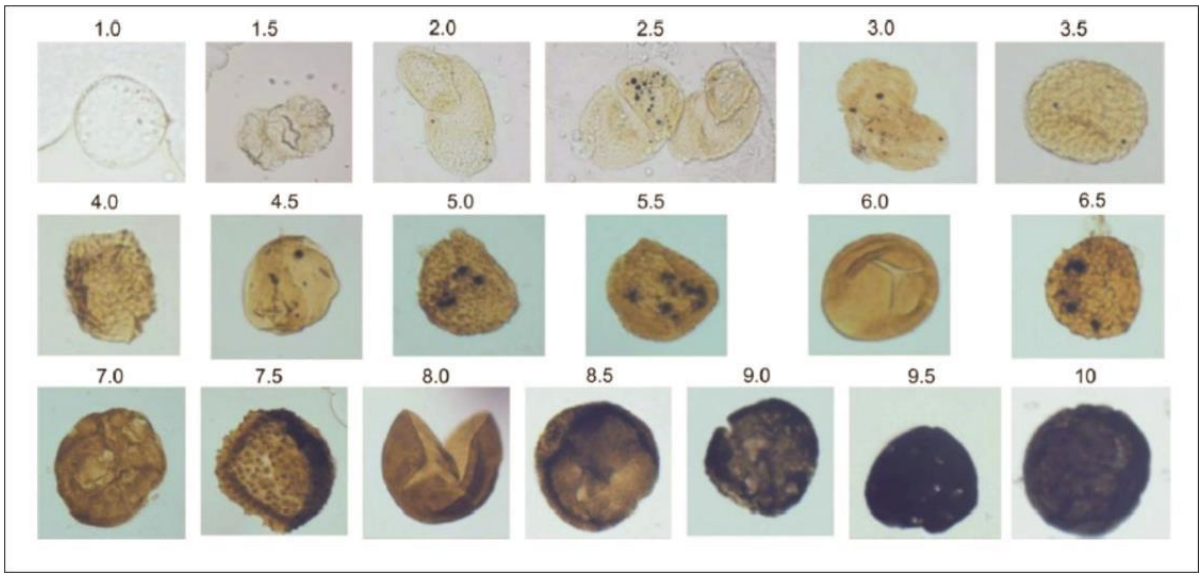
A coloração original de alguns componentes orgânicos tais como esporos e os grãos de pólen sofre alteração quando submetidos a aumento de temperatura.

A atribuição de valores numéricos a essa variação de coloração é denominada de Índice de Coloração dos Esporos (ICE).

As medidas de ICE são determinadas sobre lâminas palinofaciológicas em microscopia de luz branca transmitida, usando como base o padrão da Robertson Reaserch International Limited (Figura 16).

Os valores numéricos são obtidos através da escala de 1 a 10 variando do amarelo claro em baixas temperaturas até o preto em temperaturas elevadas.

Figura 16 - Escala de 1.0 a 10, com a variação do Índice de Coloração de Esporos (ICE) – Robertson Research Limited



Fonte: Ferreira, 2015

2.6 **Tipos de Querogênio**

Após a matéria orgânica ser incorporada aos sedimentos, a mesma é submetida a uma série de transformações, que ocorrem em pequenas profundidades (até 100 metros) e baixas

temperaturas (50 °C), chamada de fase de diagênese. (Petroleum Geocience Technoligy-PGT).

É na fase de diagênese que se inicia o processo de degradação da matéria orgânica através da atividade de microrganismos aeróbicos e anaeróbicos.

O produto final desse processo recebe o nome de querogênio, definido como sendo a fração insolúvel da matéria orgânica presente nas rochas sedimentares. Através dos elementos mais encontrados em sua composição (C, H, O) e utilizando o gráfico do tipo “Van Krevelen” é possível classificar o querogênio como sendo dos tipos I, II, III e IV (Gráfico 1).

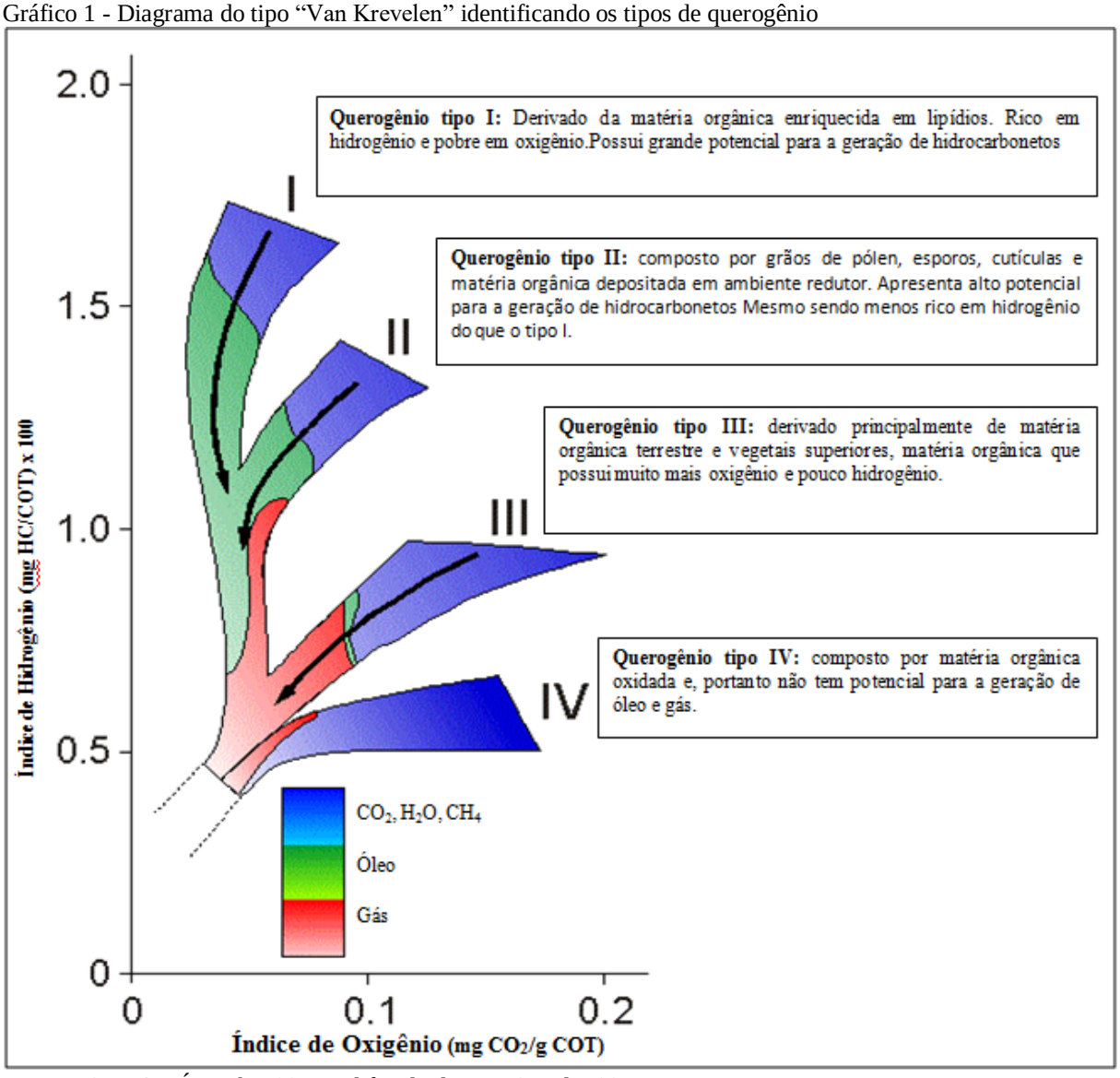
Querogênio tipo I é aquele derivado da matéria orgânica enriquecida em lipídios. Rico em hidrogênio e pobre em oxigênio possui grande potencial para a geração de hidrocarbonetos líquidos e sua ocorrência está relacionada a ambientes lacustres.

O tipo II é composto por matéria orgânica marinha. Apresenta alto potencial para a geração de hidrocarbonetos líquidos, mesmo apresentando valores inferiores de hidrogênio quando comparado ao querogênio tipo I.

O querogênio tipo III, derivado principalmente de matéria orgânica terrestre, vegetais superiores, depositados em ambientes proximais. Em grandes profundidades apresenta potencial para a geração de gás.

O querogênio tipo IV que é composto por matéria orgânica oxidada e, portanto, não tem potencial para a geração de óleo e gás.

Gráfico 1 - Diagrama do tipo "Van Krevelen" identificando os tipos de querogênio



Fonte: ESPITALIÉ *et al.*, 1985 modificado de Van Gijzel, 1982

2.7 **Análises de microscopia em luz branca transmitida e fluorescência**

A base do estudo palinofaciológico é a microscopia óptica que inclui a microscopia de luz transmitida, refletida e fluorescência. Estas técnicas, segundo (Tissot & Welte, 1984) podem ser aplicadas tanto para rochas que contenham querogênio como também para o querogênio previamente isolado (Figura 17). Os resultados obtidos fornecem principalmente informações sobre os tipos de matéria orgânica presente, seu estado de preservação e temperatura da maturação térmica.

2.7.1 Microscopia de Luz Transmitida

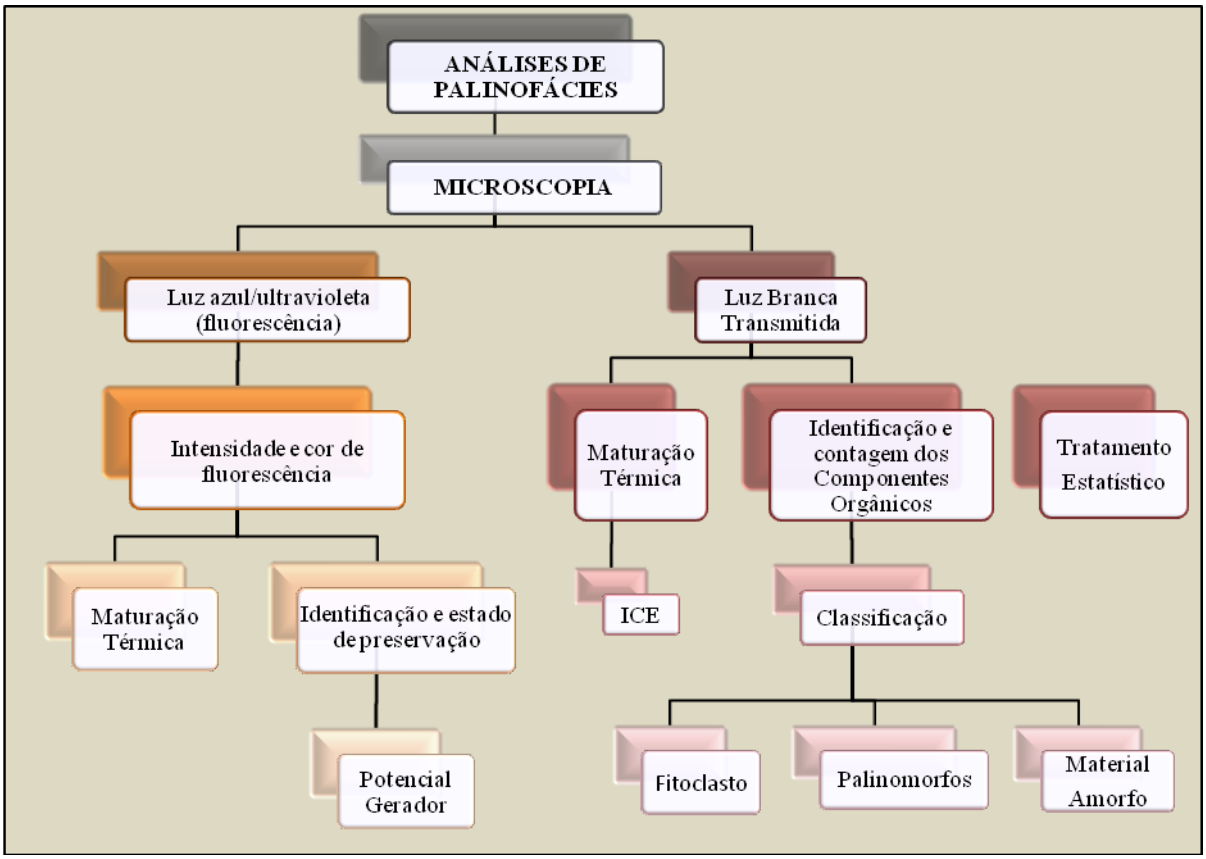
Análises em microscopia de luz branca transmitida nos permite fazer inferências a respeito dos tipos e origem da matéria orgânica, determinação das porcentagens relativas dos grupos orgânicos presentes; determinar o grau de maturação térmica atingida através do ICE e caracterizar o ambiente deposicional.

2.7.2 Microscopia em Fluorescência

De acordo com Tissot & Welte (1984), a fluorescência é uma técnica utilizada para a identificação do material orgânico liptinítico. É um dos melhores métodos para a visualização das partículas de material algálico ou de degradação microbiana finamente dispersa nos sedimentos.

Segundo Tissot & Welte (1984) e Tyson (1995), a fluorescência pode ser usada para determinar o nível de evolução térmica do querogênio através da intensidade e cor da fluorescência do potencial de geração de hidrocarbonetos da matéria orgânica.

Figura 17 - Fluxograma de análises em mcroscopia de luz branca e fluorescência



Fonte: O autor, 2018.

2.8 **Estudo de Palinofácies**

Combaz (1964) introduziu o conceito de palinofácies, sendo sua definição entendida como sendo o estudo palinológico do total de componentes da matéria orgânica contida em um sedimento após a remoção da matriz sedimentar mineral através do processo de acidificação com ácidos não oxidantes.

Porém o conceito moderno para palinofácies foi elaborado por Tyson (1995), onde a mesma foi definida como sendo o estudo palinológico de ambientes deposicionais e do potencial gerador das rochas, baseado na assembléia total de componentes de matéria orgânica particulada, sendo definida como “um corpo de sedimento contendo uma assembléia distinta de matéria orgânica palinológica que reflete um grupo específico de condições ambientais, podendo ser associada com um potencial de geração de hidrocarbonetos característico”.

De acordo com a definição, a análise de palinofácies compreende um estudo qualitativo e quantitativo do querogênio. Sendo assim tem-se uma integração de todos os aspectos dos componentes da matéria orgânica.

A metodologia de preparação das amostras e identificação da matéria orgânica particulada adotada neste estudo seguiu a classificação geral proposta por Tyson (1995) e Mendonça Filho (1999). (Figura 18).

2.8.1 Grupo da Matéria Orgânica Amorfa (MOA)

Segundo Tyson (1993) o material orgânico amorfo pode ser derivado de bactérias, fitoplâncton e agregados orgânicos degradados. O autor descreve a MOA como sendo um material orgânico que não apresenta forma ou estrutura definida, e possui matriz amorfa em grande quantidade de fragmentos pequenos devido ao retrabalhamento ou degradação bacteriana, compreendendo a matéria orgânica amorfa propriamente dita e as resinas.

As resinas são produtos naturais de vegetais superiores que se assemelham a fragmentos de âmbar colorido não estruturado com fratura conchoidal (Parry *et al.*, 1981), os quais podem ocorrer como secreções preenchendo células ou lacunas ou como exsudações extracelulares sobre a superfície da planta (caule ou folha). Contudo, tais partículas podem ser confundidas com fitoclastos não opacos se não forem observadas sob a luz azul incidente (Tyson, 1995).

2.8.2 Grupo dos Palinomorfos

Correspondem a todo componente de parede orgânica resistente ao ataque com ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico e ou Fluoclor, sendo dividido em: Esporomorfos, Zoomorfos, Microplâncton (continentais ou marinho).

Os esporomorfos estão representados pelos esporos de Briófitas, Pteridófitas e pelos grãos de pólen de Gimnospermas e Angiospermas.