



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Fernanda Botelho de Assis

**Caracterização estratigráfica, petrográfica e qualidade de rochas  
reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis na região carbonífera de  
Santa Catarina**

Rio de Janeiro

2018

Fernanda Botelho de Assis

**Caracterização estratigráfica, petrográfica e qualidade de rochas reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis na região carbonífera de Santa Catarina**

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

Orientador : Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinícius Berao Ade

Rio de Janeiro

2018

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

A848 Assis, Fernanda Botelho de.  
Caracterização estratigráfica, petrográfica e qualidade de rochas reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis na região carbonífera de Santa Catarina / Fernanda Botelho de Assis. – 2018.  
133 f. : il.

Orientador: Hernani Aquini Fernandes Chaves.  
Coorientador: Marcus Vinícius Berão Ade.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Geologia.

1. Petrologia – Santa Catarina – Teses. 2. Sedimentologia – Santa Catarina – Teses. 3. Geologia estratigráfica – Santa Catarina – Permiano – Teses. 4. Santa Catarina, Rio, Bacia – Teses. 5. Fácies – Santa Catarina – Teses. I. Chaves, Hernani Aquini Fernandes. II. Ade, Marcus Vinícius Berão. III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Faculdade de Geologia. IV. Título.

CDU 552.08:53(816.4)

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

Fernanda Botelho de Assis

**Caracterização estratigráfica, petrográfica e qualidade de rochas reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis na região carbonífera de Santa Catarina**

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.

Aprovada em 16 de março de 2018.

Coorientador: Prof. Dr. Marcus Vinicius Berao Ade

Faculdade de Geologia - UERJ

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Hernani Aquini Fernandes Chaves (Orientador)

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Prof. Dr. Egberto Pereira

Faculdade de Geologia - UERJ

---

Dr. Rogério Schiffer de Souza

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES)

Rio de Janeiro

2018

## AGRADECIMENTOS

Ao orientador prof. Dr. Hernani Chaves e ao co-orientador prof. Dr. Marcus Vinícius Berao Ade;

À Helga Elisabeth Voelcker, Gerente de Sedimentologia e Estratigrafia, PETROBRAS/ CENPES/ PDGEO/ GSE

Ao Vinícius de França Machado, Gerente de Integração Rocha Perfil, PETROBRAS/ CENPES/ PDGEO/ IRPS;

À toda equipe do Laboratório de Petrofísica Básica do CENPES (Lucas, Marcelo, João, Leandro, Cláudio e Glênio);

À Mineradora Rio Deserto;

À toda equipe do Laboratório de Laminação do CENPES (Paulo Sérgio, Alan, Arnaldo, Douglas, Gilberto e Gerson);

À toda equipe do laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (Daniele, Carmem, Celma, Débora e Nelson);

Ao prof. Dr. Sergio Bergamaschi;

Ao prof. Dr. Egberto Pereira;

Ao prof. Dr. René Rodrigues;

Ao Dr. Rogério Schiffer de Souza e ao Dorval Carvalho Dias Filho;

Ao prof. Dr. Luiz Fernando De Ros e Garibaldi Armelenti (UFRGS);

Ao Dr. Marco Brito;

Aos amigos e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho;

Ao Departamento de Estratigrafia e Paleontologia (DEPA);

À Faculdade de Geologia da UERJ (FGEL);

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ.

## RESUMO

ASSIS, Fernanda Botelho de. *Caracterização estratigráfica, petrográfica e qualidade de rochas reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis na região carbonífera de Santa Catarina*. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

O presente trabalho tem como escopo principal a caracterização petrográfica, petrofísica e estratigráfica dos arenitos do Membro Siderópolis pertencentes à Formação Rio Bonito, na região carbonífera de Santa Catarina. A fim de aprimorar essa caracterização, foi também realizado o modelo de soterramento da unidade; além de perfis estratigráficos; seções geológicas; bem como mapas estrutural e paleogeográficos. O mapa estrutural da base da camada Barro Branco permitiu identificar o rebaixamento estrutural no centro da área de estudo, ressaltando dois sistemas principais de falhas na região (NW-SE e NE-SW). Treze faciologias foram determinadas a partir da descrição dos testemunhos, as quais compõem seis associações de fácies interpretadas como depositadas em ambiente costeiro associado à laguna-ilha barreira. As seções cronoestratigráficas permitiram compreender a evolução deposicional do Membro Siderópolis e identificar um ciclo transgressivo-regressivo completo. No evento transgressivo houve o desenvolvimento e avanço dos depósitos de barreira sobre os lagunares. Enquanto no evento regressivo, o empilhamento progradacional do pacote sedimentar é caracterizado pelo registro deposicional lagunar em todos os poços e a formação das principais camadas de carvão da região. A evolução diagenética dos arenitos do Membro Siderópolis é composta pelos três estágios diagenéticos: a eodiagênese (cujo principais constituintes são: argila infiltrada, caulinita, crescimento de quartzo, cimentos de siderita e calcita); a mesodiagênese (composta por calcita poiquilotópica, crescimentos de feldspato e quartzo, além de ilita, clorita e albita); e a telodiagênese (óxidos/ hidróxidos de ferro). Relacionando a diagênese com a história térmica e de soterramento (realizado segundo a técnica backstripping), nota-se que a unidade estratigráfica permaneceu no campo da eodiagênese na maior parte de seu tempo. Fato este que, associado à presença de percolação de água meteórica pelas camadas de carvão, acentuou a atuação dos processos eodiagenéticos como a caulinitização e dissolução. Ainda, a precipitação relativamente rasa em temperatura mais fria (aprox. 1450m e 100°C) de albita, assim como as cimentações assíduas de clorita, ilita e crescimentos de quartzo na área de estudo, sugerem influência de circulação de fluidos quentes relacionados ao magmatismo Serra Geral. Quatro petrofácies foram definidas para o membro estudado utilizando dados petrofísicos e petrográficos, dentre as quais a petrofácies A é a que apresenta o melhor potencial para reservatório. De todo modo, este estudo mostra que é necessário maior cuidado na caracterização destes arenitos como reservatório. Uma vez que, a variedade faciológica, zonas com maior cimentação carbonática, níveis de intensa concentração de argilominerais autigênicos, e intensa cimentação de quartzo e feldspato geram grande heterogeneidade e compartimentação, tornando a distribuição da porosidade e permeabilidade bastante diversa no reservatório.

Palavras-chave: Petrofísica. Petrologia. Sedimentologia. Petrofácies. Membro Siderópolis.

Formação Rio Bonito. Permiano. região carbonífera de Santa Catarina.

## ABSTRACT

ASSIS, Fernanda Botelho de. *Stratigraphic, petrographic and reservoir quality characterization of Siderópolis Member arenites of Rio Bonito Formation, set in Santa Catarina coalfield*. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

The primary goal of this research is the petrographic, petrophysic and sedimentological characterization of Siderópolis Member arenites of the Rio Bonito Formation, set in Santa Catarina Coalfield. To guarantee an accurate characterization, several methods were utilized that consisted of: burial history model, stratigraphic profiles, geologic sections, as well as structural and paleogeographics maps. A structural graben was identified on the structural map of the base of the Barro Branco coal seam. The graben is located in the center of the study area and is limited by two principle fault systems (NW-SE and NE-SW). Thirteen faciolities were determined from core descriptions, which were then assembled into six facies associations interpreted to have been deposited in a coastal environment related to a lagoon-barrier island. Chronostratigraphic sections assisted in the characterization of the Siderópolis Member's depositional evolution, which was identified one complete transgressive-regressive cycle. During the transgressive event, barrier deposits developed and advanced over lagoon deposits. Whereas the regressive event shows sedimentary progradational stacking that is characterized by lagoon deposits (registered in all wells) and formation of the main coal seams in the study region. The Siderópolis Member arenites diagenetic evolution has three diagenetic stages: the early diagenesis (infiltrated clay, kaolinite, quartz outgrowth, siderite and calcite cementation as principal constituents), the late diagenesis (poiklotopic calcite, feldspar and quartz outgrowth, illite, chlorite and albite), and the telodiagenesis (iron oxides/ hydroxides). Linking diagenesis with burial and thermal history models (which was realized based on backstripping), it is observed that the stratigraphy unit stayed inside the early diagenesis window during the majority of its depositional time. Combining this burial history and the meteoric water percolation through the coal seams, enhancing the early diagenesis processes such as kaolinitization and dissolution. Moreover, the relative shallow and cooler precipitation of albite (about 1450m and 100°C), as well as, pervasive chlorite, illite and quartz outgrowth in study area, indicates an influence from hot fluid of the Serra Geral magmatism. Four petrofacies were defined for the study member using petrophysics and petrographics data. Petrofacies A has the best reservoir potential. However, the database used in this study indicates the need to be cautious when characterizing these arenites as a reservoir. This is due to the facies variation, the existence of zones with predominant carbonate cementation, levels with intense concentration of authigenic clays, and pervasive quartz and feldspar outgrowth, which lead to big reservoir heterogeneities and compartmentation and results in porosity and permeability anisotropy.

Keywords: Petrographic. Petrophysic. Sedimentology. Petrofacies. Siderópolis Member. Rio Bonito Formation. Permian. Santa Catarina Coalfield.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Fluxograma projetual deste trabalho .....	14
Figura 2 –	Mapa de localização da área de estudo .....	16
Figura 3 –	Mapa geológico da Bacia do Paraná.....	18
Figura 4 –	Modelo de embasamento da Bacia do Paraná proposto por Cordani .....	20
Figura 5 –	Modelo de embasamento segundo Milani .....	20
Figura 6 –	Carta estratigráfica da Bacia do Paraná .....	24
Figura 7 –	Principais estruturas da Bacia do Paraná .....	26
Figura 8 –	Gráfico relacionando as estruturas mapeadas e suas relações temporais com as diferentes fases tectônicas descritas .....	27
Figura 9 –	Seção estratigráfica NNE-SSW da Sucessão Eopermiana da região sul da bacia do Paraná .....	29
Figura 10 –	Ilustração da distribuição espacial dos constituintes diagenéticos no contexto de estratigrafia de sequências .....	33
Figura 11 –	Rotas de migração .....	35
Figura 12 –	Carta de eventos do sistema petrolífero Irati - Rio Bonito para região carbonífera de Criciúma – SC .....	36
Figura 13 –	Foto do intervalo com óleo do poço MML-38, tirada durante o campo .....	40
Figura 14 –	Sistema do porosímetro de câmara dupla .....	44
Figura 15 –	Esquema de uma célula de confinamento (Holder) do tipo Hassler .....	45
Figura 16 –	Esquema do equipamento para medição da permeabilidade absoluta .....	46
Figura 17 –	Representação do sistema de contagem Gazzi-Dickinson .....	49
Figura 18 –	Diagrama de proveniência tectônica .....	49
Figura 19 –	Seção explicativa da técnica de backstripping .....	51
Figura 20 –	Fluxograma mostrando as relações entre os parâmetros controladores da diagênese para rochas siliciclásticas .....	54
Figura 21 –	História de soterramento das principais unidades estratigráficas com base nos dados obtidos no poço MML-50 .....	60
Figura 22 –	Fotos mostrando algumas das principais faciologias e estruturas observadas no intervalo estudado .....	64
Figura 23 –	Mapa estrutural da lapa da camada Barro Branco .....	66
Figura 24 –	Seção litoestratigráfica NW-SE .....	67

Figura 25 –	Seção litoestratigráfica SW-NE .....	67
Figura 26 –	Seção NW-SE cronoestratigráfica .....	69
Figura 27 –	Seção SW-NE cronoestratigráfica .....	70
Figura 28 –	Mapa paleogeográfico esquemático da área de estudo .....	73
Figura 29 –	Atual (A) e Original (B) composição detrítica de 54 amostras de arenitos do Membro Siderópolis diferenciados segundo sua granulometria .....	76
Figura 30 –	Diagrama dos tipos de proveniência testônica de Dickinson, de acordo com a composição detrítica original das 54 amostras de arenito do Membro Siderópolis .....	76
Figura 31 –	Constituintes diagenéticos identificados nos arenitos do Membro Siderópolis .....	80
Figura 32 –	Constituintes diagenéticos identificados nos arenitos do Membro Siderópolis: continuação da figura 31 .....	84
Figura 33 –	Constituintes diagenéticos identificados nos arenitos do Membro Siderópolis: conclusão da figura 31 .....	87
Figura 34 –	Relação dos constituintes diagenéticos encontrados em lâmina com a estimativa da história térmica e de soterramento com variação de temperatura em relação à profundidade do Membro Siderópolis .....	92
Figura 35 –	Resultado de petrofísica básica dos poços estudados, apresentando a camada de carvão Barro Branco como datum .....	94
Figura 36 –	Fotos representativas de cada petrofácies .....	97
Figura 37 –	Resumo dos resultados obtidos pela petrofísica de laboratório e pela contagem petrográficas dos principais constituintes diagenéticos dos poços MML-38 e -50 .....	99
Figura 38 –	Diagrama de Houseknecht para comparar a importância da cimentação e da compactação na perda de porosidade para os arenitos do Membro Siderópolis .....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Modelos paleoambientais para Formação Rio Bonito .....	30
Tabela 2 –	Descobertas de gás e óleo da Bacia do Paraná. Resultados mais significativos .....	38
Tabela 3 –	Nome e localização (Datum WGS84, Projeção UTM zona 22S) dos poços, profundidade dos testemunhos .....	39
Tabela 4 –	Lista das amostras coletadas em campo .....	41
Tabela 5 –	Tabela com os valores considerados para os parâmetros usados no cálculo da pressão de confinamento .....	43
Tabela 6 –	Tabela relacionando a composição das areias à sua proveniência .....	50
Tabela 7 –	Idades consideradas para o modelo .....	59
Tabela 8 –	Código de Fácies utilizado neste trabalho .....	63
Tabela 9 –	Resumo das associações de fácies do Membro Siderópolis na área de estudo .....	73
Tabela 10 –	Resumo dos parâmetros petrográficos e petrofísicos para cada petrofácies.	96
Tabela 11 –	Resumo das características de cada petrofácies do Membro Siderópolis ....	104

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
1	<b>OBJETIVOS</b> .....	12
1.1	<b>Objetivos Gerais</b> .....	12
1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	12
2	<b>FLUXOGRAMA DE TRABALHO</b> .....	13
3	<b>LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	15
4	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	17
4.1	<b>Embasamento</b> .....	18
4.2	<b>Geotectônica</b> .....	20
4.3	<b>Estratigrafia</b> .....	23
4.4	<b>Estrutural</b> .....	25
4.5	<b>Formação Rio Bonito</b> .....	28
4.6	<b>Sistema Petrolífero</b> .....	34
4.6.1	<u>Histórico Exploratório</u> .....	36
5	<b>DADOS E MÉTODOS</b> .....	39
5.1	<b>Dados</b> .....	39
5.2	<b>Análises Petrofísicas de Laboratório</b> .....	42
5.2.1	<u>Limpeza</u> .....	42
5.2.2	<u>Pressão de Confinamento</u> .....	42
5.2.3	<u>Porosímetro</u> .....	43
5.2.4	<u>Permeâmetro</u> .....	46
5.3	<b>Petrografia</b> .....	48
5.4	<b>História de Soterramento</b> .....	51
6	<b>DIAGÊNESE</b> .....	53
6.1	<b>Diagênese em Arenitos Associados a Carvão</b> .....	54
7	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	58
7.1	<b>História de Soterramento Estimada</b> .....	58
7.2	<b>Faciologia do Membro Siderópolis</b> .....	62
7.3	<b>Análises Estratigráficas</b> .....	65
7.4	<b>Composição Detrítica e Classificação</b> .....	75

7.5	<b>Diagênese do Membro Siderópolis</b> .....	77
7.5.1	<u>Argila Infiltrada</u> .....	77
7.5.2	<u>Caulinita</u> .....	77
7.5.3	<u>Quartzo</u> .....	78
7.5.4	<u>Crescimento de Feldspato</u> .....	79
7.5.5	<u>Calcita</u> .....	79
7.5.6	<u>Ilita</u> .....	81
7.5.7	<u>Clorita</u> .....	82
7.5.8	<u>Albita</u> .....	82
7.5.9	<u>Óxidos/ hidróxidos de Ferro</u> .....	83
7.5.10	<u>Outros Constituintes Diagenéticos</u> .....	85
7.5.11	<u>Compactação</u> .....	85
7.6	<b>Estágios Diagenéticos</b> .....	88
7.7	<b>Resultados da Petrofísica Básica</b> .....	93
7.8	<b>Petrofácies</b> .....	95
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	103
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	107
	<b>APÊNDICE I</b> – Resumo de cada poço com seus respectivos gráficos com os principais cimentos autigênicos e informações petrofísicas .....	119
	<b>APÊNDICE II</b> – Tabela resumo dos parâmetros petrográficos e petrofísicos das amostras para cada petrofácies .....	124
	<b>APÊNDICE III</b> – Tabela de Quantificação Petrográfica Total .....	130

## INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a Formação Rio Bonito continua sendo alvo de estudos por empresas, devido não só aos recursos minerais que possui (carvão e urânio), como também por conter diversos intervalos arenosos passíveis de acumulação de recursos hídricos, bem como de hidrocarbonetos. Estes gerados tanto pela Fm. Ponta Grossa como pela Fm. Irati.

A PETROBRAS na busca por hidrocarbonetos na Bacia do Paraná determinou, a partir de testemunhos e perfis elétricos obtidos nos poços perfurados, as propriedades de porosidade e permeabilidade dos arenitos da Formação. No entanto, devido ao grande afastamento entre estes poços, há uma enorme incerteza em relação ao comportamento lateral dessas propriedades.

Assim sendo, a caracterização de maior detalhe desses arenitos, a partir de poços com menor afastamento, é de fundamental importância para determinar e compreender, com maior acurácia, o comportamento lateral desses parâmetros, permitindo uma melhor identificação de intervalos com potencial para bons reservatórios.

## **1 OBJETIVOS**

### **1.1 Objetivos Gerais**

Este estudo tem como principal objetivo caracterizar a qualidade de rochas reservatório dos arenitos do Membro Siderópolis através da definição de suas propriedades físicas (permeabilidade e porosidade) e petrográficas, além de entender seu comportamento lateral com base em estudos estratigráficos.

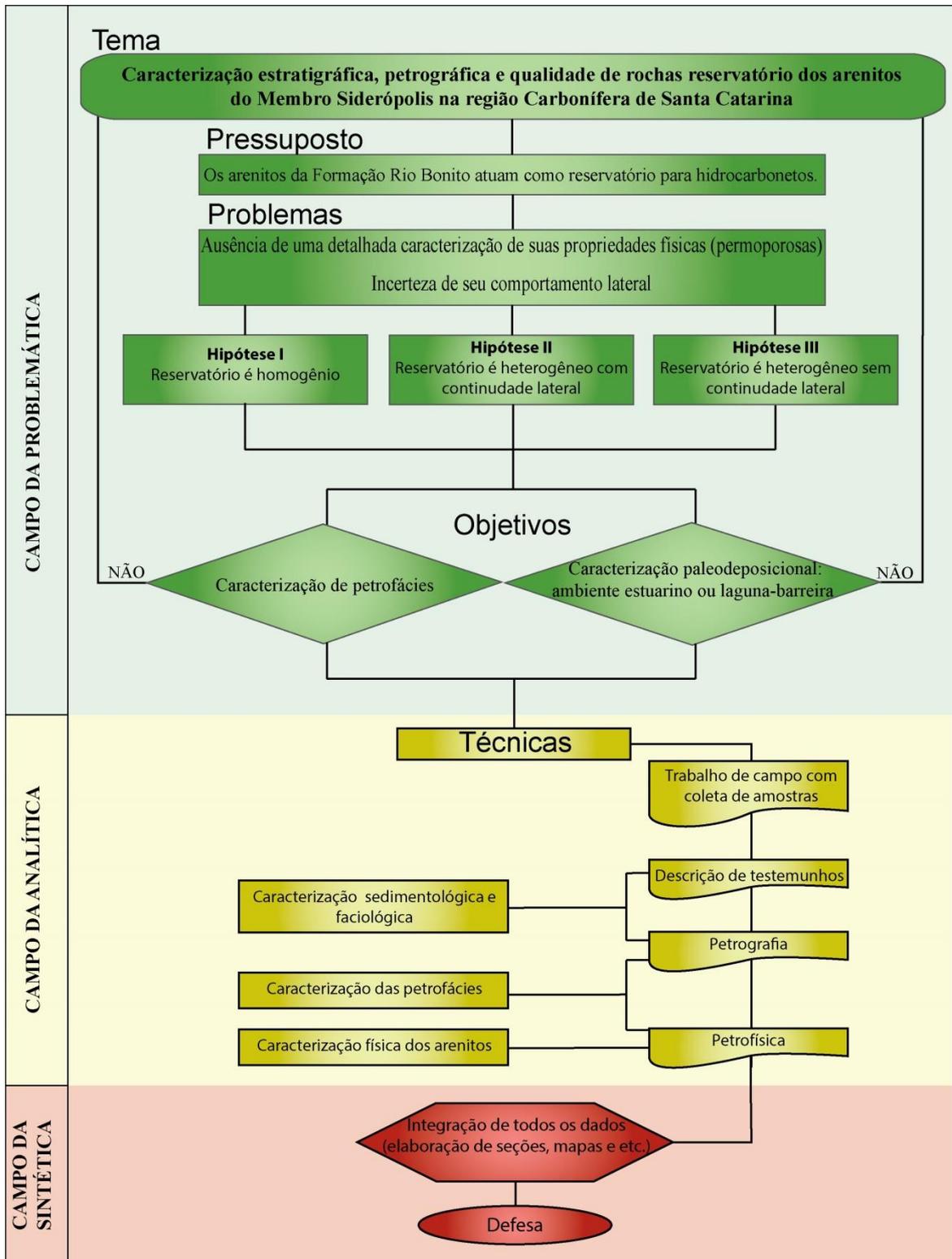
### **1.2 Objetivos Específicos**

- a) Fazer uma caracterização sedimentológica e faciológica nos testemunhos selecionados dos poços perfurados pela Mineradora Rio Deserto.
- b) Entender a continuidade lateral das fácies e suas propriedades físicas através da correlação entre os poços analisados.
- c) Realizar estudo petrográfico das amostras coletadas nos arenitos constituintes de diferentes fácies na área de estudo.
- d) Proceder as análises de petrofísica básica dos arenitos do Membro em intervalos selecionados, tendo como meta a sua caracterização permoporosa.
- e) Caracterização de petrofácies.

## 2 FLUXOGRAMA DE TRABALHO

O fluxograma processual ou, também denominado de projetual, mostra as diversas fases de desenvolvimento deste trabalho (**Figura 1**). Essas fases são segmentadas em três setores: Campo da problemática, onde são evidenciados os problemas, pressupostos, hipóteses e objetivos deste projeto; campo da analítica, onde são identificados as técnicas utilizadas e seu propósito; e campo da sintética, onde ocorre a integração de todos os resultados anteriores e a conclusão deste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma projetual deste trabalho



Fonte: A autora, 2018.

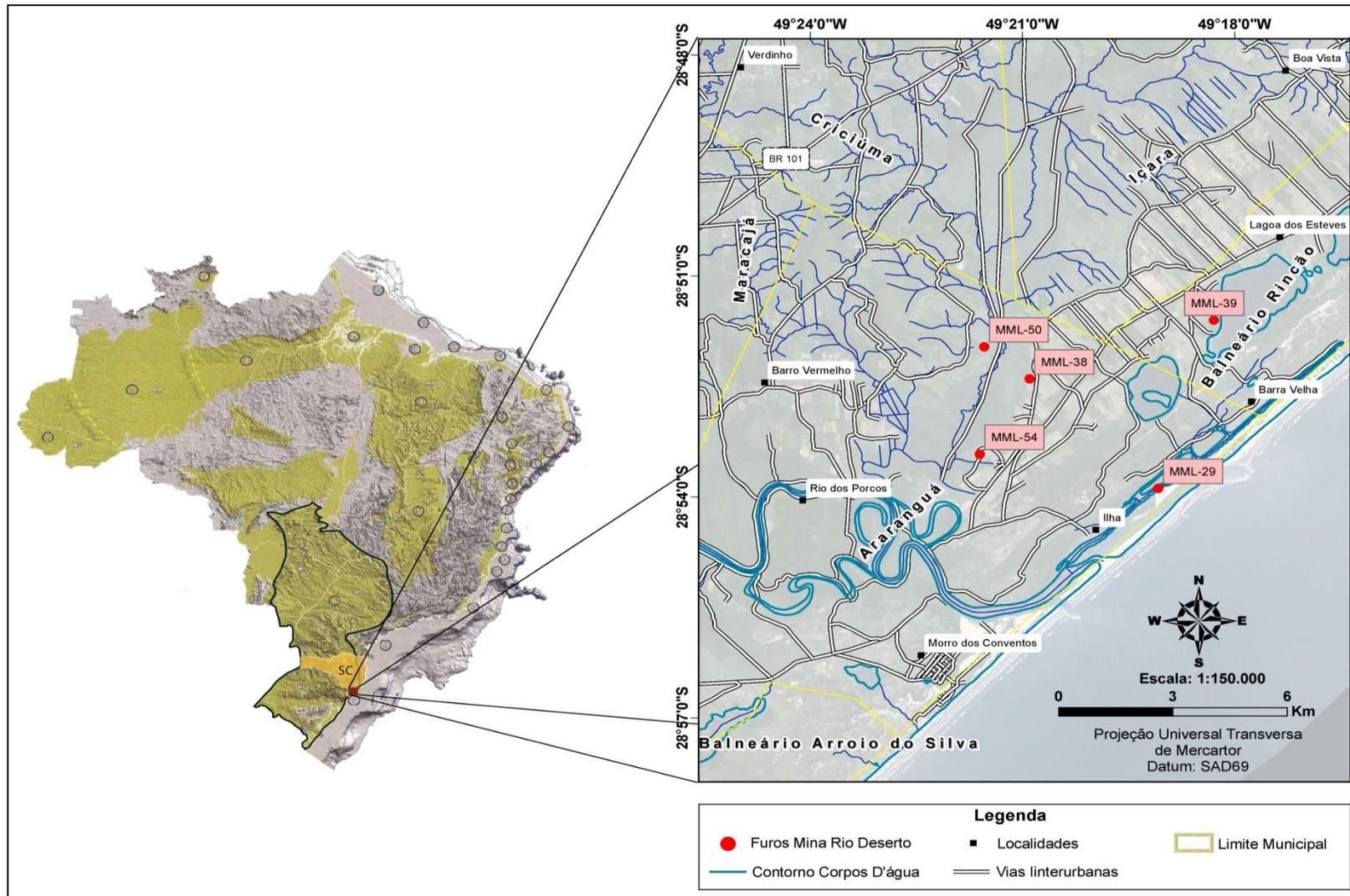
### 3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A Bacia do Paraná abrange porções do Paraguai oriental, Norte do Uruguai, Nordeste da Argentina e porção meridional do Brasil. Em planta apresenta uma geometria ovalada de orientação N-S com uma área aproximada de 1,5 milhão km<sup>2</sup> (Milani *et al* 2007). Vide **figura 2**, onde à esquerda a bacia encontra-se evidenciada em contorno preto.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados cinco furos de sondagem com testemunhos cedidos pela Mineradora de carvão Rio Deserto.

Desta forma, limitada pela abrangência desses furos, a área de estudo situa-se na porção meridional-sul e borda leste da Bacia do Paraná. Geograficamente, a região é localizada no extremo sul do Estado de Santa Catarina nos municípios de Araranguá, Içara e Balneário Rincão (**Fig.2**).

Figura 2 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: A autora, 2018.

#### 4 GEOLOGIA REGIONAL

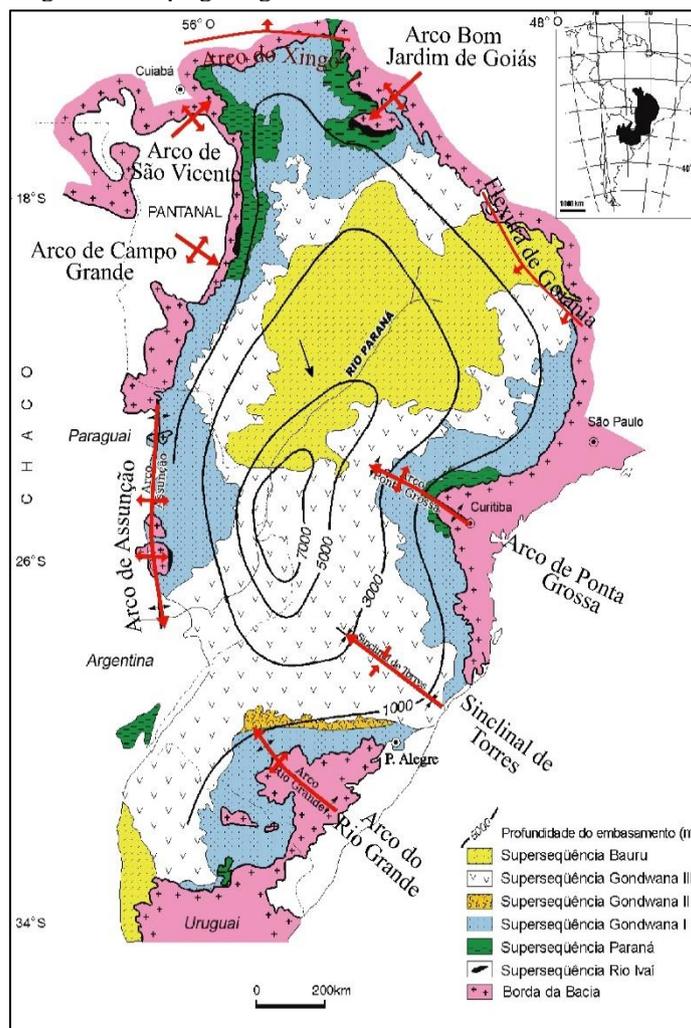
A Bacia do Paraná ao longo dos anos foi classificada como uma bacia do tipo cratônica do tipo I por Asmus & Porto (1972), intracratônica por Brito Neves (1985), bacia com possível fratura interior passando para sinéclise interior continental por Figueiredo & Gabaglia (1986), e, mais usado recentemente, como bacia do tipo sinéclise paleozoica (Milani *et al*, 2007b).

Esta bacia caracteriza-se por englobar grandes áreas (aproximadamente 1.500.000 Km<sup>2</sup>, a qual inclui os estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, São Paulo, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e parcialmente, os países Argentina, Uruguai e Paraguai) e por possuir depocentro em torno dos 7 quilômetros de espessura, que coincide geograficamente com o rio Paraná (**Fig. 3**).

Sua forma ovalada irregular apresentando uma direção NNE-SSW, sendo que dois terços de sua área são cobertas por rochas basálticas do Cretáceo Inferior. Assim, os afloramentos associados às sequencias sedimentares constituintes da bacia são basicamente situados às suas bordas.

Seus limites atuais, com exceção da borda norte-nordeste que é considerada original à deposição (Milani *et al.*, 2007b), são definidos por feições de origem tectônica como arco de *Assunción* (Borda Oeste) ou por processo erosional ocasionado pelo soergimento crustal gerado pelo rifteamento do Atlântico Sul (Borda Leste) (**Fig.3**).

Figura 3 - Mapa geológico da Bacia do Paraná.



Nota: Profundidade do embasamento é evidenciada pelas isolinhas.

Fonte: Modificado de Milani *et al.*, 2007a.

#### 4.1 Embasamento

Devido à dificuldade de se obter informações detalhadas de seu substrato, diversos trabalhos e modelos foram elaborados ao longo dos anos para definir, de forma mais apurada, um embasamento que melhor se enquadrasse a história geotectônica e estratigráfica da Bacia do Paraná.

Um dos mais relevantes e pioneiros trabalhos sobre o assunto corresponde ao de Cordani *et al.* (1984), o qual, baseando-se em informações de poços e principalmente na geologia existente ao redor da bacia, propôs como embasamento um grande “núcleo

cratônico”, também denominado de Bloco Paraná, localizado na região central da bacia e bordado por faixas móveis brasileiras.

Tal concepção de embasamento continuou sendo aceita e aprimorada, embora sem grandes mudanças, por outros autores como Zálan *et al.* (1990). Até a publicação da tese de doutorado de Milani (1997) e de seu artigo, Milani *et al.* (1998). Neste trabalho, os autores questionaram a interpretação anterior de Cordani *et al.* (1984), na qual um centro cratônico como embasamento implicaria na existência de um domínio estável sobre o mesmo. Porém, tal situação não condiz com a história de subsidência da Bacia do Paraná, pois é justamente na parte central que ocorrem as maiores espessuras e preservação da maioria das supersequências. Assim, o modelo de Cordani (1984) passou a ser considerado contraditório à evolução de subsidência da bacia e o modelo de Milani (1997) passou a ser o mais aceito.

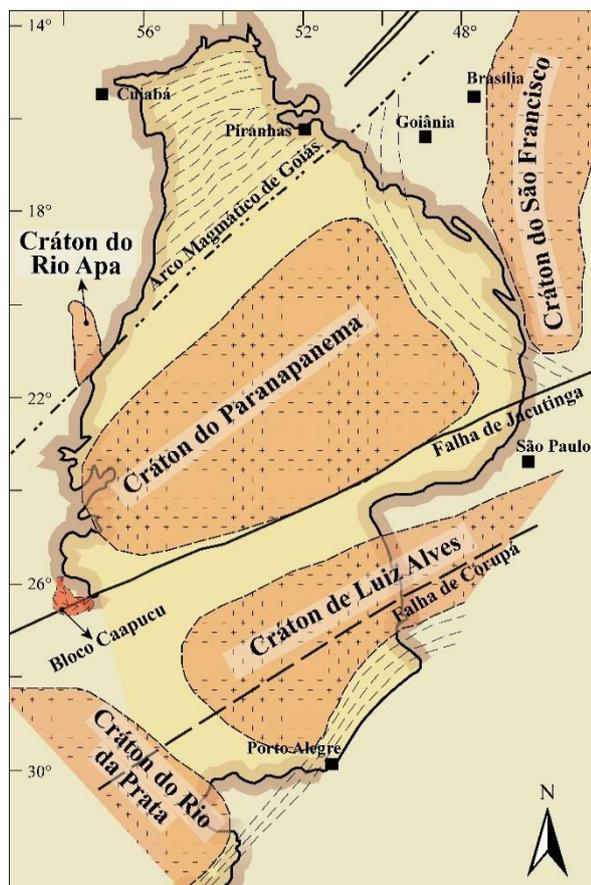
Deste modo, esses autores, baseados em informações mais detalhadas de poços, além de dados geofísicos como sísmica, magnetometria e gravimetria, formularam um modelo de embasamento que consistia em sete blocos cratônicos envelopados por faixas móveis.

Para Milani & Ramos (1998), a ocorrência e duração das supersequências da bacia estariam condicionadas, dentre outros fatores, por esse embasamento heterogêneo, no qual a região de sutura entre os terrenos cratônicos e faixas móveis atuariam como regiões de dissipação e propagação (zonas de fraqueza) de esforços vindos da margem da placa tectônica.

Uma dessas zonas de fraqueza corresponde a uma feição com desenvolvimento NE-SW, onde na porção central da bacia foi associada na sísmica a uma feição de calha (calha aulacogênica) denominada de “rifte central” (Marques *et al.*, 1993 *apud* Milani & Ramos 1998) que coincide com o domínio do lineamento Transbrasiliano (Pereira, 2000 *apud* Pereira *et al.*, 2012; **Fig.4**).

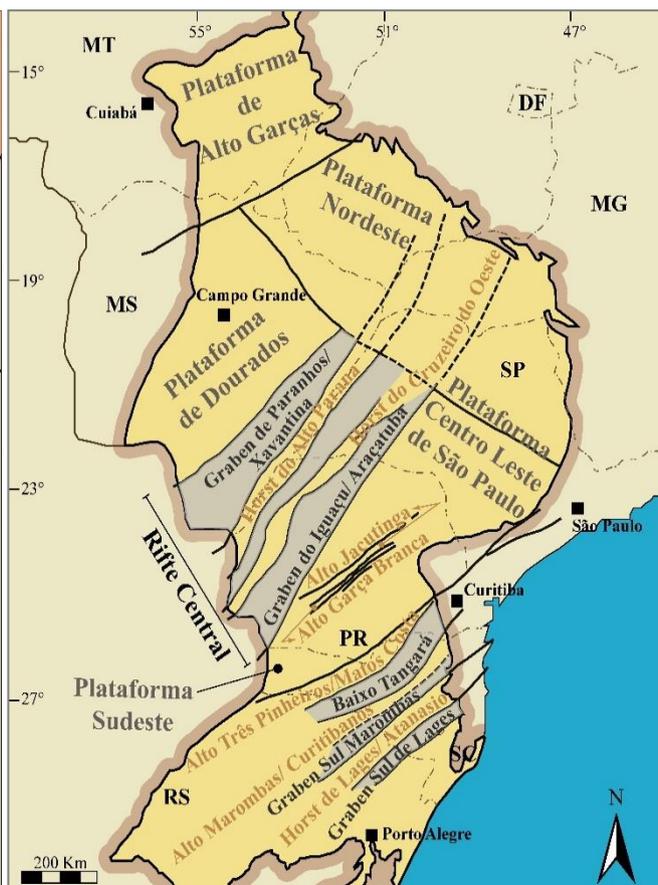
Posteriormente, com base em dados geofísicos (principalmente gravimétricos) e levando em conta trabalhos e artigos mais recentes, Cordani *et al.* (2009), através de um trabalho de atualização de seu artigo de 1984 (Cordani *et al.*, 1984), concordou com o modelo de embasamento constituído por “Mosaico de blocos” cratônicos envelopados por faixas móveis brasileiras de Milani (1997). Embora, tenha feito alterações quanto suas localizações e limites (**Fig.5**).

Figura 4 - Modelo de embasamento da Bacia do Paraná proposto por Cordani.



Fonte: Modificado de Cordani *et al.*, 2009.

Figura 5 - Modelo de embasamento segundo Milani



Fonte: Modificado de Milani 2004a e Pereira, *et al.*, 2012.

## 4.2 Geotectônica

O domínio convergente entre o paleocontinente Gondwana e a litosfera do paleoceanos Panthalassa (atualmente conhecido como a borda andina da América do Sul) produziu importantes eventos orogênicos associados a aglutinações de terrenos alóctones. Tais eventos compressivos influenciaram diretamente na história de subsidência e, portanto, deposicional da bacia do Paraná (Zalán *et al.*, 1990).

Seu registro deposicional reflete momentos diferentes da bacia. Em outras palavras, suas superseqüências representam uma superposição de distintas bacias (com limites, geometria e mecanismos de subsidência variando de uma para a outra). Tais seqüências são separadas por longos períodos de erosão ou não deposição.

A origem da Bacia do Paraná e, portanto, a acomodação de seu arcabouço estratigráfico basal (Supersequência Ivaí) ainda se encontra em aberto. Pois ainda há distintas explicações para seu mecanismo de subsidência. Dentre estes, destacam-se os trabalhos de Almeida (1980), Fulfaro *et al.* (1982), Cordani *et al.* (1984), além de Zalán (Zalán *et al.*, 1990 e 1991) e Milani (Milani 1992, Milani & Ramos 1998, Milani 2004, Milani *et al.*, 2007a).

De forma geral, comparando-se os trabalhos citados acima, há duas concepções para o desenvolvimento inicial da bacia. A primeira, defendida principalmente pelos trabalhos de Zalán (Zalán *et al.*, 1990 e 1991), o mecanismo inicial de subsidência da bacia teria sido possivelmente de natureza térmica, resfriamento, com estiramento ocorrido pós-orogenia Brasileira.

Já a segunda concepção é defendida, dentre outros pesquisadores, por Milani e Cordani (Milani 1992, Milani & Ramos 1998, Milani 2004a, Milani *et al.*, 2007a, Cordani *et al.*, 1984). Para esses autores, o mecanismo de subsidência da bacia foi iniciado pela implantação de feições estruturais com orientação NW-SE, no que atualmente é a porção meridional da bacia. Tais estruturas correspondem à grábens transtensivos (também chamados de calhas aulacógenas ou zona denominada “rifte central” desde o modelo de embasamento de Marques *et al.* 1993 *apud* Milani 2004a).

Embora ainda não haja consenso quanto à origem da bacia, é inegável a conexão entre sua história tectono-estratigráfica com a orogenia Brasileira, além de outras orogenias. Estas são decorrentes de colisões de terrenos aulacógenos na borda oeste do paleocontinente Gondwana (borda pré-cordilheirana) e estão associadas tanto a fases de subsidência como também a momentos de não deposição e/ou erosão da bacia.

Segundo Ramos *et al.* 1986 *apud* Milani & Ramos 1998, a Orogenia Oclóyica do Neo-Ordoviciano teria ocasionado a reativação de zonas de fraqueza do embasamento que propiciaram a deposição da **Supersequência Ivaí**. Seu topo é demarcado por uma discordância erosiva neossiluriana por exposição subaérea.

No Devoniano a sedimentação retoma com a **Supersequência do Paraná** por um mecanismo de flexura regional, sendo caracterizada como uma fase de aquiescência tectônica. Tal mecanismo coincide com a Orogenia Precordilheirana de idade Emsiana (Astini 1996 *apud* Milani & Ramos 1998). Seu topo, além de uma considerável lacuna de erosão, prossegue para uma de não deposição interpretadas como reflexos da

Orogenia Herciniana e da paleoposição em altas latitudes (formação de geleiras) durante o Neodevoniano e Eocarbonífero.

Segundo Zalán *et al.*, (1991) a Orogenia Herciniana (colisão Patagônia e Antártica contra a América do Sul) teria sido responsável pelo soerguimento na região incluindo a formação do Arco de Assunção.

Após, com o deslocamento do Gondwana para norte, teria ocorrido o derretimento das geleiras continentais numa condição ambiental periglacial, permitindo o início da deposição da Supersequência **Gondwana I** no Pensilvaniano.

Alguns trabalhos (Milani 1997, 2004a e Milani & Ramos 1998), ainda associam esta fase Permo-Carbonífera da bacia a um momento de reativação de falhas com movimentação essencialmente *strike-slip*. As reativações seriam relacionadas à Orogenia Eopermiana denominada Sanrafaélica (ou La Ventana-Cabo). Ainda, Milani (1992), atribui a este evento a formação do arco magmático Choiyoi, elemento este considerado pelo autor como importante para a restrição da comunicação da bacia com o paleoceanos Panthalassa.

A quarta Supersequência Gondwana II é caracterizada por uma subsidência de caráter distensional localizada. Sendo assim, seu registro limitado às regiões do Rio Grande do Sul e Uruguai em depressões geradas por grábens oriundos dessa distensão.

O topo desta supersequências é demarcado pelo isolamento da bacia às incursões marinhas do Panthalassa, seguido por uma grande discordância erosional correspondente ao mais significativo hiato da bacia, e gerada por um evento de abrasão eólica.

A última Supersequência da bacia, Gondwana III, é composta por sedimentos provindos de extensos campos de dunas Juro-Cretáceas, ocorrendo juntamente ao magmatismo na bacia. Esse evento magmático está relacionado à quebra do paleocontinente Gondwana e coincide com o fim desta sequência.

O resfriamento e compensação isostática pós-magmatismo propiciou a deposição característica de ambiente semiárido que compõem a Bacia Baurú. Associado a este registro sedimentar, há corpos intrusivos alcalinos de dois estágios magmáticos, um com idade de 87 - 80 M.a. e o outro de 70 - 60 M.a. (Almeida & Melo, 1981 *apud* Milani, 2007a).

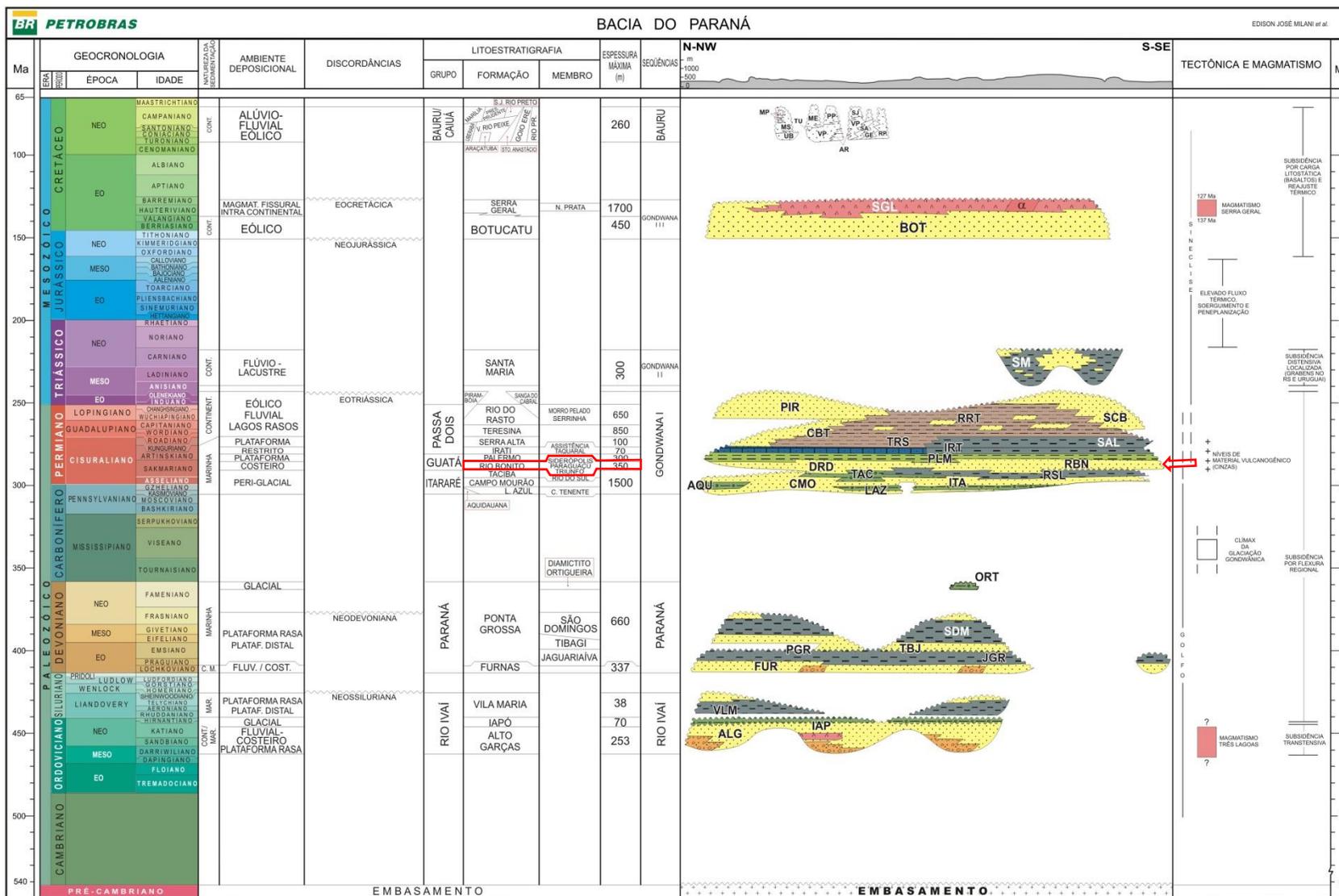
### 4.3 Estratigrafia

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Paraná vem sido tema de diversos trabalhos e pesquisas por décadas. O primeiro trabalho de sistematização estratigráfica da bacia corresponde ao importante relatório de White em 1908, no qual o autor descreveu as camadas sedimentares da Serra do Rio do Rastro situada no Estado de Santa Catarina.

Após, outros importantes trabalhos foram publicados, detalhando e aprimorando a então coluna White, considerada uma importante referência da geologia da bacia. Atualmente, sua carta estratigráfica mais aceita e utilizada ainda é a de Milani (2007b). Nela o registro sedimentar compreende idades de 465 Ma até 65 Ma, entre os quais grandes hiatos, correspondentes a grande parte do tempo da bacia, os subdividem.

Milani (1997) e Milani *et al* (2007b) define as unidades estratigráficas da bacia em seis supersequências (unidades de segunda ordem). Das quais as três primeiras são sucintamente compostas por ciclos transgressivos-regressivos: Supersequências (I) Rio Ivaí, do Ordoviciano-Siluriano, (II) Paraná, do Devoniano e (III) Gondwana I, do Carbonífero ao Eotriássico. Enquanto as três últimas são constituídas por sedimentos terrígenos com ígneas associadas. São as supersequências: (IV) Gondwana II, do Meso a Neotriássico, (V) Gondwana III, do Neojurássico ao Eocretáceo e (VI) Bauru, do Neocretáceo (**Fig. 6**).

Figura 6 - Carta estratigráfica da Bacia do Paraná.



Nota: Unidade de estudo ressaltada em vermelho.

Fonte: Milani, 2007b.

A unidade estratigráfica de estudo, Membro Siderópolis, está inserida dentro da Supersequência Gondwana I, no intervalo denominado litoestratigraficamente de Formação Rio Bonito, o qual será abaixo abordado.

#### 4.4 Estrutural

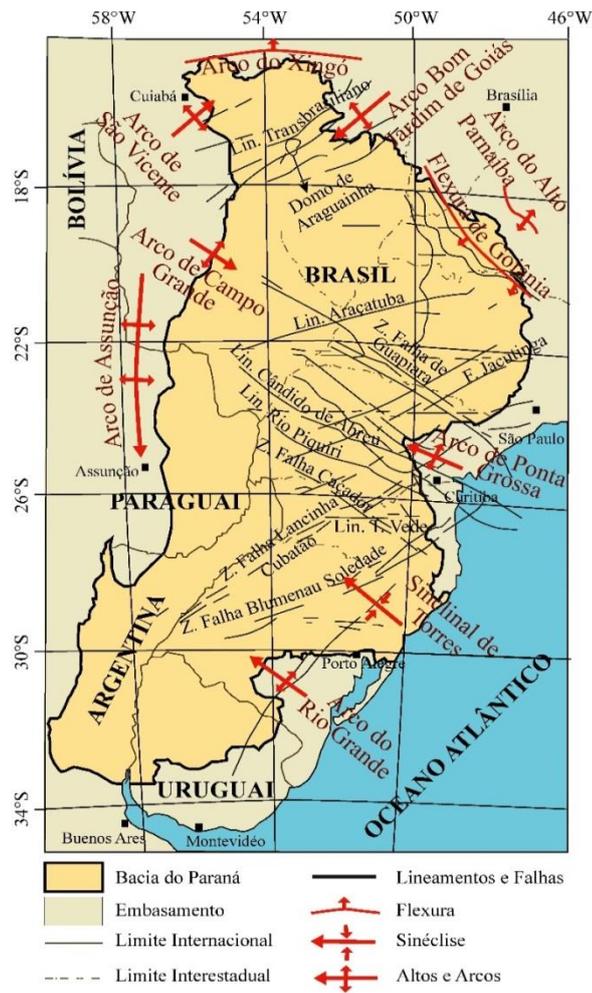
A evolução tectono-sedimentar da Bacia do Paraná é fortemente controlada por *trends* estruturais. Estes por sua vez acabam sendo condicionados pela constituição/ heterogeneidade do embasamento, e suas inerentes zonas de fraqueza que são reativadas durante os eventos tectônicos. Tais zonas, ao serem reativadas, dissipam os estresses da margem para a intraplaca através de movimentações verticais e horizontais.

As estruturas mais frequentes em reativações correspondem a movimentos transcorrentes, como estruturas em echelon, falhas reversas, dobras e estruturas em flor. Assim, também é possível gerar estruturas em *horsts* e *grabens*.

Como já discutido anteriormente, a movimentação dessas estruturas seria forte o suficiente para influenciar na distribuição de fácies, depocentros, geometria, além de localizadas deformações na bacia (Zálan *et al.* 1990). Observando a **figura 7**, é possível visualizar que tais zonas de fraqueza geram um mosaico de blocos limitados por falhas e fraturas que seccionam inclusive os sedimentos aflorantes.

Zálan *et al.* (1987 e 1990) ainda subdivide o arcabouço estrutural da bacia em três grandes lineamentos principais: NW-SE, NE-SW e E-W. Os quais os dois primeiros seriam os mais significativos (**Fig.7**). Tais lineamentos são compostos por falhas, zonas de falhas e arcos. As estruturas com trend NW-SE estão associadas aos grandes diques. Elas teriam sido reativadas devido ao peso fornecido pelo grande derrame e intrusão de corpos ígneos durante a quebra juro-cretácea do Gondwana. Além da geração de falhas e fraturas com esse trend, tal evento (denominado de reativação Wealdiana ou ainda evento Sul-Alântico) ocasionou uma significativa fase de subsidência na bacia. Já as estruturas com trend NE-SW, que não possuem associação com os diques e comumente estão relacionadas a movimentações transcorrentes, poderiam estar relacionadas à orogenia La Ventana, a qual gerou uma tensão principal máxima de sul para norte, durante a sutura da

Figura 7 - Principais estruturas da Bacia do Paraná.



Fonte: Modificado de Pereira *et al.*, 2012.

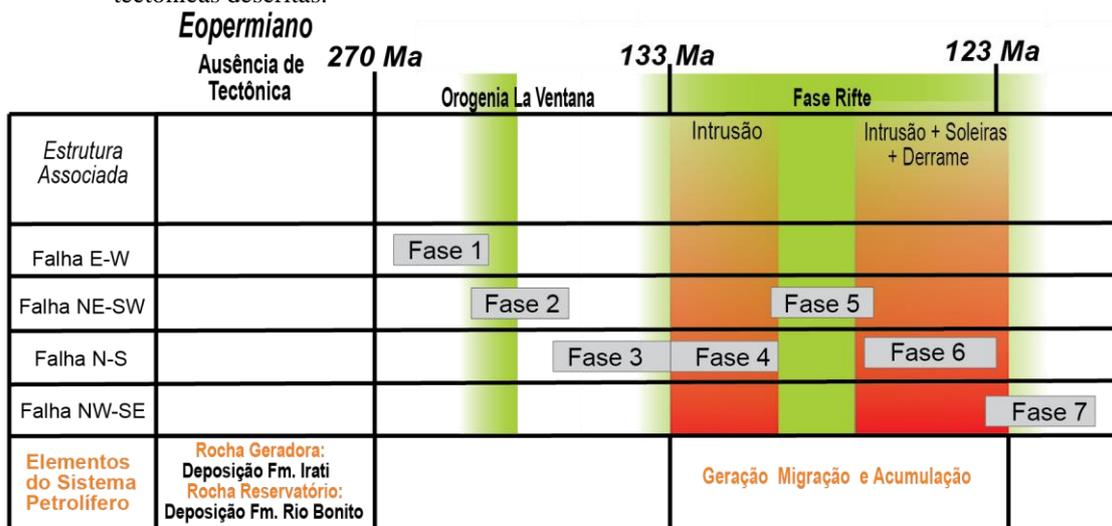
Patagônia à América do Sul entre o Permiano e o Triássico (Milani 1997). Os lineamentos com direção E-W são relacionados por Zálan *et al.*, (1987) ao desenvolvimento do Atlântico Sul, uma vez que se iniciaram no Triássico e apresentam forte paralelismo com as zonas de fratura oceânica.

Em estudos mais recentes, como o de Freitas *et al.* (2006), incluem estruturas com direção preferencial N-S, de regime rúptil e superficiais. Estas possuem como hipótese para sua origem o próprio tectonismo da Placa Sul-Americana, no Cretáceo durante o rifteamento que culminou na abertura do Atlântico Sul e proporcionou a propagação de estruturas N-S na direção oeste.

O trabalho de Loutfi *et al.* (2010) resume tais estruturas quanto a sua cronologia e reativações em relação aos eventos tectônicos da bacia (**Fig.8**). As duas primeiras fases correspondem às falhas pré-existentes, do embasamento, que foram deslocadas por falhas NE-SW pré-derrame (pré-Eocretáceo). Estas últimas, teriam sido ocasionadas por compressão

intraplaca durante Orogenia La Ventana (sigma 1 com direção N-S) (Loutfi *et al.*, 2010). Posteriormente, as estruturas NE-SW da fase anterior foram seccionadas por falhas N-S desenvolvidas nas fases 3 e 4. Estas etapas são relacionadas ao intenso tectonismo tafrogênico do Gondwana durante o Cretáceo, onde também foram reaproveitadas como dutos por intrusões de diques.

Figura 8 - Gráfico relacionando as estruturas mapeadas e suas relações temporais com as diferentes fases tectônicas descritas.



Fonte: Corrêa & Pereira (2005) *apud* Loutfi *et al.*, 2010.

A quinta fase é caracterizada pela reativação das falhas NE-SW da fase 3 seccionando os diques N-S (fase 4). A fase 5 é considerada de curto intervalo de tempo e precursora ao derrame por Loutfi *et al.*, 2010. Porém, Rostirolla *et al.* (2000 *apud* Loutfi *et al.*, 2010), define a fase 5 no Alto de Quatiguá como posterior ao magmatismo. As últimas fases são definidas pelas ígneas da Formação Serra Geral (fase 6) que são cortadas por estruturas de trend NW-SE, cuja geração estaria para o final a pós-magmatismo.

Ainda, Loutfi *et al.* (2010) associa as estruturações das fases 1, 2, 5 e 6 a possíveis trapas estruturais para Formação Rio Bonito. Enquanto que as soleiras e extravasamento da fase 6 teriam ocasionado não só geração de hidrocarbonetos, como também atuariam como trapas estratigráficas.

Por fim, o autor sugere duas principais formas para migração: a migração horizontal do óleo, graças à movimentação por falhas que colorariam a geradora e o reservatório em contato lateral; e as falhas, principalmente, as de NE-SW dos eventos 2 e 5. Em contrapartida, a presença de falhas NW-SE (fase 7) corresponderiam a vias de escape e, portanto, a não acumulação de óleo.

#### 4.5 Formação Rio Bonito

A Formação Rio Bonito é umas das unidades estratigráficas, da Bacia do Paraná, mais estudadas devido aos seus recursos comerciais de carvão, urânio e, subcomercialmente de óleo (França *et al.*, 1995).

A unidade foi definida pela primeira vez por White (1908) como *Camadas Rio Bonito* e inserida no topo da série Tubarão. Após, em 1947, passou a ser classificada como Formação Rio Bonito dentro do Grupo Guatá (Gordon Jr., 1947). Já na década de 70 houve a subdivisão informal da Formação com os trabalhos de Medeiros *et al.*, 1971 e Thomaz Filho & Medeiros, 1972 (*apud* Schneider *et al.*, 1974) em 3 intervalos (inferior, médio e superior). Finalmente em 1974, culminou na proposta de Schneider para nomeação desses intervalos supracitados, para as unidades litoestratigráficas: Membros Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis, respectivamente. Porém, é importante ressaltar que essa divisão só foi adotada nos Estados do Paraná e Santa Catarina (área de estudo deste trabalho), não sendo, portanto, utilizada em São Paulo e no Rio Grande do Sul. Entretanto, Lopes (1995) identificou os três membros da Formação no Rio Grande do Sul.

Posteriormente, vários trabalhos (como Zalán *et al.*, 1990; Milani & Ramos, 1998; Milani, 1997; Milani *et al.*, 1994 e 2007b) aprimoraram a identificação dos intervalos cronoestratigráficos e conseqüentemente melhor definiram seu topo e base temporal e estratigraficamente em relação às unidades sobrepostas e sotopostas a eles. Embora, ainda fosse mantido e usado como base as subdivisões dos trabalhos anteriormente mencionados.

Os artigos de Holz (2003), Holz *et al.* (2000, 2010), Holz & Kalkreuth (2004) e de Kalkreuth *et al.* (2010) definiram uma seção estratigráfica correlacionando a porção sul (Rio Grande do Sul) indivisa da Formação Rio Bonito com a norte (Santa Catarina), dividida nos três membros (**Fig.9**). Por essa seção, nota-se que a poção superior da Formação, Membro Siderópolis, em Santa Catarina ocorre conjuntamente com o início da deposição da Formação Palermo no Rio Grande do Sul. Ainda, a seção evidencia que os carvões econômicos do Rio Grande do Sul antecedem os da região carbonífera de Santa Catarina.



Diferentemente do intervalo arenoso basal, as camadas de carvão associadas a este Membro são mais espessas e lateralmente mais contínuas (Holz *et al.*, 2010; Aboarrage & Lopes, 1986).

Embora litoestratigraficamente não haja mudanças tão significativas, a definição do ambiente deposicional ainda é controversa e apresenta diversas propostas.

Sucintamente há quatro propostas principais quanto ao sistema deposicional para a Formação Rio Bonito (**Tabela 1**). Os principais trabalhos que melhor representam cada conceito correspondem aos de: (I) Schneider (1974); (II) Milani (1997 e 1998); (III) Lavina & Lopes (1987), Alves & Ade (1996) e Della Favera *et al.* (1992 e 1994); e (IV) Holz (1998, 1999, 2003), Holz *et al.* (2010), Holz & Kalkreuth (2004) e Kalkreuth *et al.*, (2010).

Tabela 1 - Modelos paleoambientais para Formação Rio Bonito

Membros	Modelos Paleoambientais			
	Modelo I	Modelo II	Modelo III	Modelo IV
Siderópolis	Marinho Litorâneo	Fluvial gradando para ambiente mais restrito	Sistema Ilha-barreira (marinho litorâneo)	Estuarino influenciado por maré e onda
Paraguaçu	Marinho transgressivo, secundariamente planície de maré	Lower shoreface gradando para fluvial	Marinho transgressivo	Marinho transgressivo
Triunfo	Flúvio-deltaico	Gradação fluvial, deltaico e no topo estuarino	Fluvial e lacustre/estuarino	Fluvial e estuarino

Fonte: Modelo I - Schneider (1974); Modelo II - Milani (1997 e 1998); Modelo III - Lavina & Lopes (1987), Alves & Ade (1996) e Della Favera *et al.* (1992 e 1994); Modelo IV: Holz (1998, 1999, 2003), Holz *et al.* (2010), Holz & Kalkreuth (2004) e Kalkreuth *et al.*, (2010).

Pelo primeiro modelo (I) o ambiente deposicional para o Membro Triunfo é interpretado como flúvio-deltaico, gradando para um ambiente marinho transgressivo com alguns sedimentos indicativos de planície de maré do Membro Paraguaçu, terminando em ambiente marinho litorâneo onde as camadas de carvão seriam provenientes de lagunas e mangues costeiros do Membro Siderópolis.

No segundo modelo (II), a Formação é dividida em 3 sequências de quarta ordem, no qual o membro basal é composto por toda sequência II e parte inferior da III, caracterizando um ambiente gradando de fluvial para deltaico (Sequência II) e no topo, estuarino (base da Sequência III). Este registro sedimentar teria preenchido os vales incisos glaciais.

Posteriormente, o início da sedimentação do Membro Paraguaçu teria registro proveniente de ambiente de *lower shoreface* (topo da Sequência III). Este ambiente grada, no Membro Siderópolis, para fluvial na base e passando para um ambiente mais restrito no topo (Sequência IV). Esta última teria propiciado a geração dos carvões em pântanos provenientes de lagoas protegidas por barreiras do Membro Siderópolis (Sequência IV).

O terceiro modelo (III) caracteriza, no Rio Grande do Sul, a formação inicialmente relacionada a um ambiente fluvial e estuarino que preencheu os vales incisos glaciais num regime transgressivo (Membro Triunfo ?). Com o preenchimento desses paleovales houve o avanço da sedimentação em direção à bacia (em direção à Norte), propiciando o desenvolvimento de grandes cordões litorâneos. Estes, por sua vez, propiciaram um sistema laguna barreira ao topo da formação (Membro Siderópolis ?). Nesta concepção as camadas carboníferas teriam sido geradas nas lagunas atrás das ilhas-barreiras.

O modelo (IV) difere do anterior ao defender um sistema estuarino com influências tanto da maré quanto da ação de ondas como ambiente deposicional para a geração das camadas de carvão do Membro Siderópolis, ao invés de um ambiente deposicional lagunar (sistema ilha-barreira).

Quanto a suas propriedades petrofísicas, trabalhos anteriores mencionam superficialmente, como boas as características permoporosas dos arenitos da Formação Rio Bonito, especialmente os da porção superior (Membro Siderópolis), com porosidades variando ao redor de 20%, mesmo a profundidades superiores a 4000 metros (França & Caldas, 1983; França, 1984 e Milani *et al.*, 1990 a,b). Sendo assim é considerado por alguns como um dos melhores reservatórios da bacia (França *et al.*, 1995). Essa significativa porosidade até mesmo em grandes profundidades é propiciada pela porosidade secundária (França & Caldas, 1983, Milani *et al.*, 1990a e Lopes *et al.*, 2003a).

A evolução diagenética dos arenitos da Formação Rio Bonito é abordada por diversos trabalhos, onde destacam-se os de França & Caldas (1983), França (1984), Ketzer *et al.* (2003) e Bocardi *et al.* (2009).

Especificamente sobre os arenitos do Membro Siderópolis, França & Caldas (1983) os descrevem como bem selecionados, limpos e extremamente quartzosos. Embora mencione variação na sua composição detrítica ao sul da Bacia devido à maior concentração de feldspatos, França (1984) definiu 4 estágios diagenéticos que serão descritos a seguir.

O primeiro estágio diagenético ocorre a perda da porosidade primária pela compactação mecânica, ocasionando contatos côncavo-convexos e suturados por dissolução por pressão. O segundo estágio marca a perda de porosidade pela formação de cutículas de

ilita e carbonatização (cimentação de siderita). A cimentação de siderita é considerada pelo autor como vital para qualidade do reservatório, pois teria sido ela a responsável pela sustentação do arcabouço e preservação do empacotamento dos grãos durante a subsidência e, devido à corrosão de grãos detríticos, aumento do espaço intergranular.

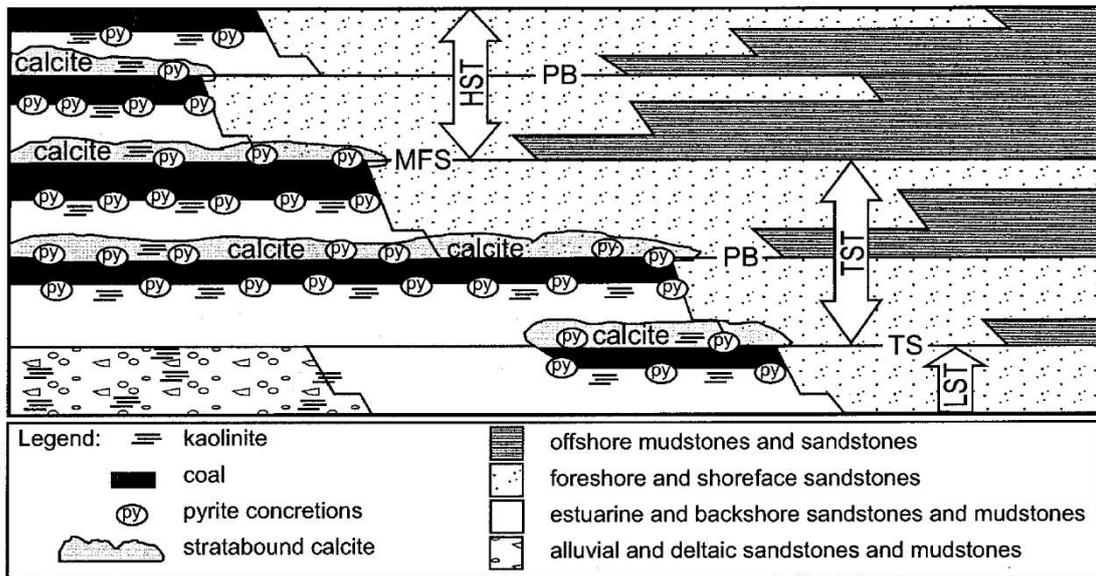
O terceiro estágio é caracterizado pelo ganho de porosidade secundária pela descarbonatização (pela ação do  $H_2CO_3$ ), no qual a porosidade é gerada pela dissolução do cimento, grãos e fragmentos líticos instáveis. França (1984) cita duas possibilidades para a dissolução do feldspato. A primeira, de forma indireta, o feldspato seria primeiramente substituído por carbonato e depois dissolvido. A segunda, o feldspato seria dissolvido diretamente pelo ataque do ácido carbônico.

Posteriormente, no quarto e último estágio, há a perda dessa porosidade secundária através de processos mecânicos e químicos devido à instabilidade do arcabouço após o processo de dissolução. Os processos mecânicos constituem no rearranjo e fraturamento de grãos, enquanto os químicos agem pela cimentação de calcita e anidrita poiquilotópica. Apenas localmente, França (1984) observa crescimentos de quartzo.

Ketzer (2003) identificou padrões de distribuição de constituintes diagenéticos (pirita, calcita, siderita e caulinita) associados a estratigrafia de sequências, ao analisar a porção inferior (até as camadas de carvões) da Formação Rio Bonito à sudeste do Rio Grande do Sul. O autor relacionou a cimentação por carbonatos (calcita e siderita) à limites de sequências e parassequências, onde a sua formação foi principalmente precipitada em profundidades rasas abaixo do fundo do mar, devido ao longo tempo de residência dos sedimentos. Particularmente, os limites que apresentam camadas de carvão associados, apresentam formação de calcita *stratabound* e concreções de pirita ao longo dessas superfícies. Por estarem relacionadas aos carvões, sua ocorrência preferencial se restringe aos tratos de sistemas transgressivos e de mar alto.

Ainda, nos limites de sequências e parassequências, pode apresentar caulinita e dissolução de grãos, relacionado a percolação de água meteórica. Em parassequências cujo limite possua camadas de carvão, costuma-se ter uma proporção maior desses constituintes devido a adição de ácidos orgânicos e  $CO_2$ , gerados nesses depósitos lagunares, à água meteórica percolante. A figura abaixo (**Fig.10**) faz uma síntese das distribuições desses constituintes diagenéticos no contexto de estratigrafia de sequências.

Figura 10 - Ilustração da distribuição espacial dos constituintes diagenéticos no contexto de estratigrafia de seqüências.



Fonte: (Ketzer *et al.*, 2003).

#### 4.6 Sistema Petrolífero

O potencial petrolífero da Bacia do Paraná consiste basicamente a dois sistemas já bem conhecidos: O sistema petrolífero Ponta Grossa-Itararé (!) e o Iratí-Rio Bonito-Pirambóia (!). Em ambos os casos, os sistemas petrolíferos citados são classificados como não convencionais, devido à subsidência insuficiente da rocha geradora que alcançou suficiente maturação térmica para geração de óleo graças às intrusões de diabásio, além de serem fortemente controlados pelo arcabouço estrutural da bacia.

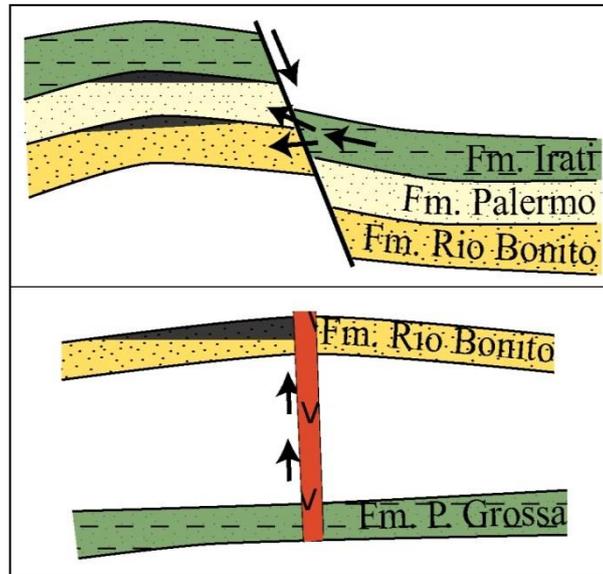
O primeiro sistema petrolífero, propício à ocorrência de gás e condensado, apresenta como geradora os intervalos de folhelhos da Formação Ponta Grossa, como reservatório, os arenitos do Grupo Itararé e, secundariamente, os da Formação Rio Bonito. Em segundo plano, os arenitos da Formação Furnas, sills fraturados e eventuais corpos arenosos dentro da Formação Ponta Grossa podem atuar como reservatórios. Costumam estar entre 3000 a 4600 metros de profundidades (Zalán *et al.*, 1990).

Foco deste trabalho e favorável à geração de óleo, o segundo sistema petrolífero apresenta como rocha geradora os folhelhos betuminosos da Formação Iratí e, como reservatório os arenitos das Formações Rio Bonito e Pirambóia. Secundariamente, acumulações de hidrocarbonetos podem ser encontradas nos arenitos da Formação Botucatu, sills e diques fraturados, além de esporádicas lentes de arenito dentro das Formações Iratí e Palermo. Comumente, ocorrem em profundidade inferior a 3000 metros, embora sua migração lateral alcance uma distância entre 200 a 300 km (Zalán *et al.*, 1990).

Neste trabalho o sistema petrolífero estudado corresponde ao Iratí-Rio Bonito, cujo foco são os arenitos reservatórios da Formação Rio Bonito. Estratigraficamente, a rocha geradora deste sistema (Formação Iratí), encontra-se acima da rocha reservatório (Fm. Rio Bonito). Porém, o arcabouço estrutural da bacia possibilitou, por vezes, o reposicionamento destas de forma a possuírem contato lateral (**Fig. 11**).

Assim, sua migração apresenta um forte controle estrutural. Loutfi *et al.* (2010) sugere um processo migratório horizontal, caso as rochas geradora e reservatório estejam em contato lateral, ou um processo o qual o óleo percorreu as falhas NE-SW e, secundariamente, as E-W.

Figura 11 - Rotas de migração.

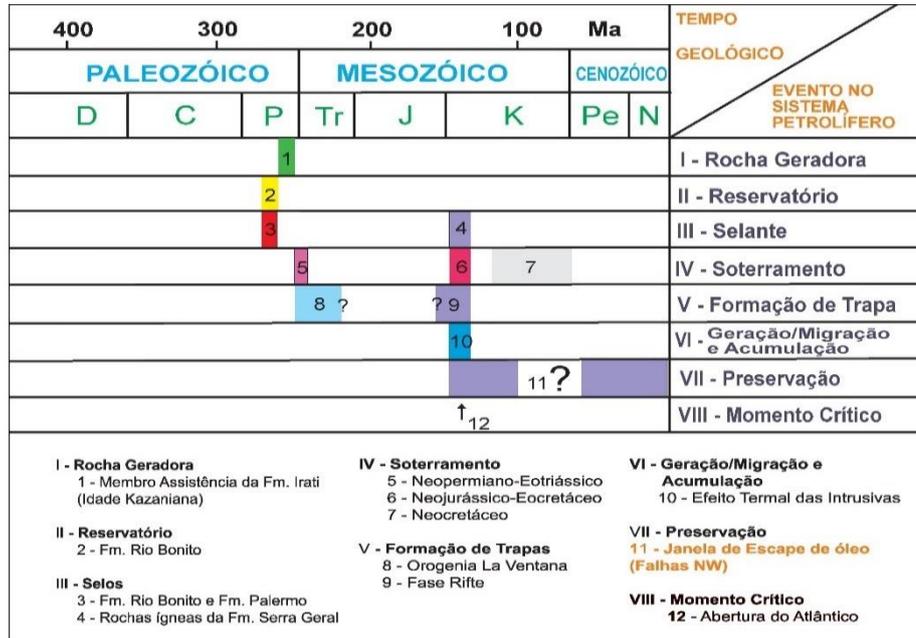


Fonte: (Milani *et al.*, 1990).

Ainda estes autores, indicam que esses sets de falhas foram gerados anteriormente ou concomitantemente ao derrame basáltico associado à Formação Serra Geral.

Como selo, a Formação Rio Bonito possui níveis pelíticos sobrepostos da Formação Palermo, os folhelhos e arenitos (com baixa porosidade e permeabilidade) da própria unidade Rio Bonito, além de diques e sills (Milani *et al.*, 1990 a,b e Loutfi *et al.*, 2010). As trapas de caráter estrutural são associadas às orogenias que modificaram a bacia (Milani *et al.*, 1990 a,b). Ainda, intrusões ígneas são consideradas um bom potencial de acumulação e, portanto, trapeamento estratigráfico. Visto que elas são contemporâneas à geração dos hidrocarbonetos. A **figura 12** mostra a carta de eventos do sistema petrolífero foco deste trabalho.

Figura 12 - Carta de eventos do sistema petrolífero Irati - Rio Bonito para região carbonífera de Criciúma - SC.



Fonte: Loutfi *et al.*, 2010 (baseada no artigo de Araújo *et al.*, 2000).

#### 4.6.1 Histórico Exploratório

Segundo Milani *et al.* (1997), a história exploratória da Bacia do Paraná pode ser dividida em cinco significativos estágios descontínuos:

**Fase I (até 1953):** Através de alguns indícios de hidrocarboneto na borda leste da bacia, O Serviço Geológico e Mineralógico Brasileiro, O Conselho Nacional do Petróleo, O governo do Estado de São Paulo e mais algumas empresas particulares deram início à pesquisa pioneira da região, mesmo que com pouco desenvolvimento devidos às limitações tecnológicas da época. Nessa fase houve a perfuração sistemática de poços rasos que foram colocados próximos às já conhecidas exsudações de petróleo.

**Fase II (1958 a 1975):** Corresponde a uma fase de intensa atividade feita pela PETROBRAS e empresas privadas estrangeiras. Através da perfuração de mais poços stratigráficos, foi possível definir um arcabouço preliminar da bacia. Ainda, esta etapa é caracterizada pelo início da exploração de hidrocarbonetos na bacia, embora com dificuldades referentes à tecnologia utilizada na época. Em outras palavras, dificuldades na aquisição de linhas sísmicas *onshore* e obtenção de informações abaixo de grandes províncias magmáticas.

Apesar disso, identificou-se mais acumulações subcomerciais, locações, em Santa Catarina de gás (Herval Velho e Taquara verde) e óleo (Matos Costa e Três Pinheiros), vide **tabela 2**. No início dos anos 1970, a PETROBRAS desviou seus interesses e, portanto, suspendeu sua exploração na bacia do Paraná para as grandes descobertas *offshore*.

Fase III (1975 a 1978): Correspondeu a uma fase consideravelmente estagnada, sem perfurações, aquisição de dados geofísicos ou avanços no desenvolvimento das pesquisas na bacia.

Fase IV (1979 a 1985): Estágio caracterizado por atividades das empresas Consórcio Paulipetro e a British Petroleum, ambas sob contrato de risco. Além da PETROBRAS, embora atuasse secundariamente. Nesta época o desenvolvimento de novas tecnologias para aquisição e processamento de dados geofísicos permitiram definir as primeiras estruturas abaixo das rochas ígneas. Com o fechamento do Consórcio Paulipetro em 1983, não foram feitos poços para comprovar tais estruturas. Logo após, a British Petroleum encerrou suas atividades na bacia sem descobertas.

Fase V (1986 adiante): O início desta etapa é marcado pela volta da PETROBRAS através das mais novas tecnologias de aquisição e processamento sísmico da época. Também foi desenvolvido, em 1988, o NEXPAR (Núcleo de Exploração da Bacia do Paraná) que condensou os estudos na bacia.

Em 1996, a Petrobras após várias pesquisas, obteve a primeira descoberta de acumulação de gás comercial da bacia, denominado Campo de Barra Bonita. Este campo corresponde ao sistema petrolífero Ponta Grossa – Itararé (Milani *et al.*, 2007a), vide **tabela 2**. Mais recentemente, em novembro de 2013 foram ofertados 19 blocos na 12ª rodada da ANP. Todos contendo como objetivo exploratório principal o Grupo Itararé.

Tabela 2 - Descobertas de gás e óleo da Bacia do Paraná. Resultados mais significativos.

Ano	Poço	Fluido	Unidade	Tipo	Observações
1961	2-TV-1-SC	Gás	Fm. Rio Bonito	Subcomercial	Taquara Verde
1967	1-TP-2-SC	Óleo	Fm. Rio Bonito	Subcomercial	Três Pinheiros
1973	1-HV-1-SC	Gás	Fm. Rio Bonito	Subcomercial	Herval Velho
1973	3-HV-2-SC	Gás	Fm. Rio Bonito	Subcomercial	Herval Velho
1974	1-MC-2-SC	Óleo	Fm. Rio Bonito	Subcomercial	Matos Costa
1981	1-RCH-1-SC	Gás	Gp. Itararé	Subcomercial	
1982	1-CA-3-PR	Gás + Condensado	Fm. Ponta Grossa	Subcomercial	
1982	1-CA-3-PR	Gás	Gp. Itararé	Subcomercial	
1982	2-RP-1-PR	Gás	Gp. Itararé	Subcomercial	
1982	2-CB-1-SP	Gás	Gp. Itararé	Subcomercial	Cuiabá Paulista
1983	1-CS-2-PR	Gás + Condensado	Gp. Itararé	Subcomercial	Chapéu do Sol
1986	9-RP-1-SP	Gás	Fm. Tatuí	Subcomercial	
1996	1-BB-1-PR	Gás	Gp. Itararé	Comercial	Campo de Barra Bonita

Fonte: Milani *et al.*, 1990. NEXPAR.