



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Geologia

Maria Fernanda Barroso Maia

**Análise microfaciológica e qualitativa dos folhelhos do Membro  
Jaguariaíva, Formação Ponta Grossa, Bacia do Paraná**

Rio de Janeiro

2017

Maria Fernanda Barroso Maia

**Análise microfaciológica e qualitativa dos folhelhos do Membro Jaguariaíva, Formação  
Ponta Grossa, Bacia do Paraná**

Tese apresentada, como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutora, ao Programa de Pós-  
Graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis da  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Bergamaschi

Rio de Janeiro

2017



Maria Fernanda Barroso Maia

**Análise microfaciológica e qualitativa dos folhelhos do Membro Jaguariaíva, Formação  
Ponta Grossa, Bacia do Paraná**

Tese apresentada, como requisito parcial para  
obtenção do título de Doutora, ao Programa de Pós-  
Graduação em Análise de Bacias e Faixas móveis,  
da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Aprovada em 28 de Julho de 2017.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Sergio Bergamaschi (orientador)

Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. René Rodrigues

Faculdade de Geologia – UERJ

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Bertolino

Faculdade de Geologia – UERJ/CETEM

---

Dr. Marcelo Fagundes de Rezende

Petrobras – CENPES

---

Dr. Leonardo Costa de Oliveira

Petrobras – E&P-LIBRA/RESERVATÓRIO

Rio de Janeiro

2017

Dedico esta Tese aos meus pais, meu marido Alan e ao meu filho Pedro Lucas alicerces da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A realização desta tese marca o fim de uma importante etapa da minha vida. Gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de forma decisiva para a sua concretização.

Ao Prof. Dr. Sergio Bergamaschi, pela orientação, dedicação e paciência, indispensáveis durante o andamento deste trabalho.

Ao Prof. René Rodrigues por suas valiosas contribuições nos seminários.

Ao Professor Dr. Luiz Carlos Bertolino da UERJ-CETEM, por toda colaboração despendida na elaboração dessa tese e dos dados de DRX e MEV realizados nos laboratórios do CETEM.

Agradeço aos técnicos do CETEM na preparação das amostras e ao amigo Vitor Schwenck que me auxiliou na execução das análises.

A todos os colegas da UERJ, em especial aqueles que permitiram uma alegria maior no meu dia: Fernanda Setta, Leandro, Darly e Aline.

Aos professores da UERJ que contribuíram para meu crescimento profissional no decorrer desses quatro últimos anos.

A CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos, e ao Programa de Pós Graduação em Geociências da Universidade do Estado do Rio de Janeiro por todas as oportunidades de crescimento profissional e pessoal criadas.

A UFRRJ que além de ser minha instituição de origem, proporcionou nos últimos anos uma experiência maravilhosa como professora substituta.

Aos meus colegas e mestres da UFRRJ, Sergio Valente, Artur Corval e Soraya Gardel Carelli pelo incentivo sempre presente.

Ao meu ex-aluno e amigo Guilherme Brügger que sempre esperou o sucesso desta tese para dizer que foi um grande apoiador e colaborador.

A minha família, por toda a dedicação e amor sempre presentes em minha vida. Mãe Maria e Pai Julio, muito obrigada.

Em especial ao meu marido Alan que me fortalece com o seu amor todos os dias e me ajuda a enxergar a luz nos momentos mais desesperadores da vida e a Pedro Lucas, meu filho amado, que é o meu raio de sol, aos quais dedico todo o meu amor.

E por último e mais importante agradeço a Deus e a toda energia positiva do universo.

## RESUMO

MAIA, MARIA FERNANDA BARROSO. *Análise microfaciológica e qualitativa dos folhelhos do Membro Jaguariaíva, Formação Ponta Grossa, Bacia do Paraná*. 2017. 133f. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

As pesquisas realizadas na Bacia do Paraná visando o potencial gerador de gás das rochas do Devoniano Inferior ainda correspondem a novas fronteiras de estudos. Para ocorrer uma exploração bem sucedida de um play de *shale* é necessário conhecimento sobre qual é a quantidade de gás que pode ser extraído até a superfície e o seu respectivo custo associado. No entanto, o teor de COT, a caracterização da trama petrográfica e dos argilominerais devem ser considerados com o objetivo de estabelecer uma associação com a qualidade selante e/ou geradora e/ou reservatório de uma rocha microclástica. Os estudos foram realizados em dois poços situados na Sub-bacia de Apucarana (PALEOSUL 03-JA-PR) e na Sub-bacia de Alto Garças (PALEOSUL 02-RV-MS). Cinco microfácies foram reconhecidas com base no tamanho dos grãos, mineralogia e conteúdo fossilífero. As microestruturas foram analisadas com o propósito de definir características para as rochas geradoras do possível sistema petrolífero Ponta Grossa – Ponta Grossa, representadas por feições erosivas associadas a fluxos trativos, as quais ocorrem preferencialmente no poço PALEOSUL 03-JA-PR e refletem a alternância de processos decantativos e trativos. A menor quantidade de microestruturas físicas, como foi visto no poço PALEOSUL 02-RV-MS, está associada à maior atividade biogênica. A composição mineralógica dos folhelhos analisados nos ensaios de difratometria de raios X (DRX) mostrou que a composição mineralógica é constituída em todas as amostras por illita e caulinita, enquanto interestratificados de illita/esmectita e clorita/esmectita ocorrem somente na Sub-bacia de Apucarana. A vermiculita está presente nos folhelhos da Sub-bacia de Alto Garças. Quartzo, muscovita, feldspato e siderita são frequentes nas amostras das sub-bacias e sugerem uma fonte continental mais proximal. As análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) são compatíveis com os resultados obtidos na petrografia e na difratometria de raio X. Os dados obtidos nos dois poços estudados nesta tese apresentam assembléias minerais distintas e contrastantes, indicando modificações dos parâmetros diagenéticos e história térmica e, conseqüentemente, uma influência direta das condições de sedimentação. As amostras foram classificadas como argilitos, argilito-sílticos e siltitos arenosos e indicam uma baixa qualidade para funcionarem como rochas selantes. Todavia, existe a possibilidade dessas rochas comportarem-se como locais propícios para um reservatório não convencional.

Palavras-chave: Bacia do Paraná. Formação Ponta Grossa. Membro Jaguariaíva. Análise Petrográfica. Difratometria de raios X. Reservatório não convencional.

## ABSTRACT

MAIA, MARIA FERNANDA BARROSO. *Microfaciological and qualitative analysis of the shales of the Jaguariaíva Member, Ponta Grossa Formation, Paraná Basin*. 2017. 133f. Tese (Doutorado em Geologia) – Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

The researches made in Paraná Basin looking for the gas potential generator of low Devonian rock formations match with a new study boundaries. The investigation for a successful exploration of shale plays needs of the knowledge about gas amount available to be extracted and its associated cost. However, the TOC content, the description of petrographic fabric and clay minerals should be considered in order to connect the sealant, generator and reservoir quality of the microclastic rock. The studies were carried out in two wells located on Apucarana subbasin (PALEOSUL 03-JA-PR) and the Alto Garças subbasin. Five microfacies were recognized based on mineralogy, grain size and fossiliferous contents. Microstructures were analyzed to define the characteristics of generators rocks of the possible Ponta Grossa-Ponta Grossa petroleum system. These microstructures occur preferably on the well PALEOSUL 03-JA-PR and are represented by erosive features related to trative flow, reflecting the alternation of decantation and trative process. The smallest numbers of microstructures on well PALEOSUL 02-RV-MS are associated with biogenic activity. The mineralogical composition of shales analyzed by X-Ray diffractometry shows illite and kaolinite in all samples while interlayered of illite-smectite and chlorite-smectite were indentified just on Apucarana subbasin. The vermiculite is common in shale of Alto Garças subbasin. Quartz, muscovite, feldspars and siderite are present on samples of two subbasins and point to a proximal continental source. Scanning electron microscope (SEM) analyses confirm the petrographic and X-Ray diffractometry results. The data of the wells studied in this thesis indicate contrasting diagenetic parameters and thermal history for the two subbasins and a consequent influence on sedimentation conditions. The samples are classified as argillites, clay siltstones and sandy siltstones with poor perspectives to work like a sealant rock. On the other hand, there is a possibility of these shales behave as a non-conventional reservoirs.

Keywords: Paraná Basin, Ponta Grossa Formation, Jaguariaíva Member, Petrographic analyses. X-Ray diffractometry and Non-conventional reservoir.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|             |                                                                                                   |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Mapa de localização da Bacia do Paraná.....                                                       | 17 |
| Figura 2 -  | Localização dos Poços PALEOSUL 03-JA-PR e PALEOSUL 02-RV-MS                                       | 18 |
| Figura 3 -  | Método para eliminação da matéria orgânica.....                                                   | 22 |
| Figura 4 -  | Processo de preparação das amostras.....                                                          | 25 |
| Figura 5 -  | Séries de reações dos argilominerais.....                                                         | 29 |
| Figura 6 -  | Carta Estratigráfica da Bacia do Paraná.....                                                      | 32 |
| Figura 7 -  | Mapa do contorno estrutural e mapa de isópacas.....                                               | 33 |
| Figura 8 -  | Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço<br>PALEOSUL 03-JA-PR..... | 45 |
| Figura 9 -  | Perfil sedimentológico do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                             | 47 |
| Figura 10 - | Resultados de Aguiar (2004) para o poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                    | 49 |
| Figura 11 - | Gráfico de classificação nomenclatural.....                                                       | 55 |
| Figura 12 - | Fotomicrografia da lâmina PR- 30,50.....                                                          | 57 |
| Figura 13 - | Fotomicrografia da lâmina PR-35,90.....                                                           | 58 |
| Figura 14 - | Fotomicrografia da lâmina PR- 42,60.....                                                          | 59 |
| Figura 15 - | Fotomicrografia da lâmina PR-56,83.....                                                           | 60 |
| Figura 16 - | Fotomicrografia da lâmina PR-80,84.....                                                           | 61 |
| Figura 17 - | Fotomicrografia da lâmina PR-101,46.....                                                          | 62 |
| Figura 18 - | Fotomicrografia da lâmina PR-101,55.....                                                          | 63 |
| Figura 19 - | Fotomicrografia da lâmina PR-108,19.....                                                          | 63 |
| Figura 20 - | Fotomicrografia da lâmina PR-120,10.....                                                          | 64 |
| Figura 21 - | Imagens das amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                               | 66 |
| Figura 22 - | Fotomicrografia da lâmina MS-13,15.....                                                           | 68 |
| Figura 23 - | Fotomicrografia da lâmina MS-13,30.....                                                           | 69 |
| Figura 24 - | Fotomicrografia da lâmina MS-13,95.....                                                           | 70 |
| Figura 25 - | Fotomicrografia da lâmina MS-16,00.....                                                           | 71 |
| Figura 26 - | Fotomicrografia da lâmina MS-22,75.....                                                           | 72 |
| Figura 27 - | Fotomicrografia da lâmina MS-33,90.....                                                           | 73 |
| Figura 28 - | Fotomicrografia da lâmina MS-36,00.....                                                           | 74 |
| Figura 29 - | Fotomicrografia da lâmina MS-39,60.....                                                           | 75 |

|                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 30 - Fotomicrografia da lâmina MS-43,50.....                                                                                    | 75  |
| Figura 31 - Fotomicrografia da lâmina MS-48,00.....                                                                                    | 76  |
| Figura 32 - Fotomicrografia da lâmina MS-51,80.....                                                                                    | 77  |
| Figura 33 - Fotomicrografia da lâmina MS-56,15.....                                                                                    | 78  |
| Figura 34 - Fotomicrografia da lâmina MS-59,75.....                                                                                    | 79  |
| Figura 35 - Imagens das amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                        | 80  |
| Figura 36 - Associação de Microfácies F1.....                                                                                          | 83  |
| Figura 37 - Associação de Microfácies F2.....                                                                                          | 84  |
| Figura 38 - Associação de Microfácies F3.....                                                                                          | 85  |
| Figura 39 - Associação de Microfácies F4.....                                                                                          | 86  |
| Figura 40 - Associação de Microfácies F5.....                                                                                          | 87  |
| Figura 41 - Difrátogramas de Rocha Total das amostras do Poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                                   | 88  |
| Figura 42 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 35,95 metros e (B) 54,55 metros do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....  | 91  |
| Figura 43 - Difrátogramas de raios X das amostra de profundidade (A) 56,60 metros do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                       | 92  |
| Figura 44 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 66,50 metros e 81,00 metros do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....      | 93  |
| Figura 45 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 101,51 metros e (B) 108,10metros do poço PALEOSUL 03-JA-PR..... | 94  |
| Figura 46 - Difrátogramas de raios X da amostra de profundidade 120,00 metros do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                           | 95  |
| Figura 47 - Difrátogramas de Rocha Total do Poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                | 96  |
| Figura 48 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 12,15 metros e (B) 12,20 metros do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....  | 99  |
| Figura 49 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 13,20 metros e (B) 13,25 metros do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....  | 100 |
| Figura 50 -- Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 13,35 metros e (B) 13,90 metros do poço PALEOSUL 02-RV-MS..... | 101 |
| Figura 51 - Difrátogramas de raios X das amostras de profundidades (A) 14,00 metros e (B) 15,35 metros do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....  | 102 |
| Figura 52 - Difrátogramas de raios X da amostra de profundidade 22,65 metros do                                                        |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                                                                                                                                                                      | 103 |
| Figura 53 - Perfil composto do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                                                                                                                                                                       | 107 |
| Figura 54 - Perfil composto do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                                                                                                                                       | 108 |
| Figura 55 - Relação entre temperatura, estágio diagenético, reflectância da vitrinita (maturidade da rocha), alterações na camada interestratificada illita/esmectita e porcentagem de illita na camada interestratificada illita/esmectita..... | 115 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Posições referentes aos picos principais (direção (001) dos argilominerais em condições normais (N), após glicolagem (G) e aquecimento ou calcinação (A).....                                                             | 27  |
| Tabela 2 - Classificação sistemática dos argilominerais cristalinos.....                                                                                                                                                             | 28  |
| Tabela 3 - Influência tectônica sobre a sedimentação da Formação Ponta Grossa nas Sub-bacias de Apucarana e de Alto Garças, descritas na literatura:.....                                                                            | 34  |
| Tabela 4 - Análise granulométrica das amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                                                                                                                                        | 54  |
| Tabela 5 - Análise granulométrica das amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                                                                                                        | 54  |
| Tabela 6 - Análise composicional das amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                                                                                                                                         | 56  |
| Tabela 7 - Análise composicional das amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                                                                                                         | 56  |
| Tabela 8 - Composição dos argilominerais em função da porcentagem atômica das espécies, determinada pela técnica de EDS das amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....                                                                  | 67  |
| Tabela 9 - Composição dos argilominerais em função da porcentagem atômica das espécies, determinada pela técnica de EDS das amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                  | 81  |
| Tabela 10 - Composição dos argilominerais em função da porcentagem atômica das espécies, determinada pela técnica de EDS das amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....                                                                 | 89  |
| Tabela 11 - Argilominerais identificados através dos difratogramas de raios X nas amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR: vermiculita, illita e caulinita.....                                                                           | 90  |
| Tabela 12 - Minerais identificados através dos difratogramas de raios X nas amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS quartzo, muscovita, argilominerais (clorita/vermiculita/montmorillonita e caulinita), albita, siderita e goetita..... | 97  |
| Tabela 13 - Argilominerais identificados através dos difratogramas de raios X nas amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS: vermiculita, illita e caulinita.....                                                                           | 98  |
| Tabela 14 - Propriedades dos principais grupos de argilominerais.....                                                                                                                                                                | 116 |

## SUMÁRIO

|         |                                                                                                                              |    |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|         | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                                                                                       | 14 |
| 1       | <b>A ÁREA DE ESTUDOS, OBJETIVOS E MÉTODOS.....</b>                                                                           | 16 |
| 1.1     | <b>Área de estudo.....</b>                                                                                                   | 16 |
| 1.2     | <b>Objetivos.....</b>                                                                                                        | 18 |
| 1.3     | <b>Material e métodos.....</b>                                                                                               | 19 |
| 1.3.1   | <u>Petrografia.....</u>                                                                                                      | 19 |
| 1.3.2   | <u>Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV .....</u>                                                                       | 20 |
| 1.3.3-  | <u>Difratometria de Raios X.....</u>                                                                                         | 21 |
| 1.3.3.1 | Eliminação da matéria orgânica.....                                                                                          | 21 |
| 1.3.3.2 | Eliminação do carbonato.....                                                                                                 | 23 |
| 1.3.3.3 | Pipetagem.....                                                                                                               | 23 |
| 1.3.3.4 | Solvatação com etilenoglicol (ou glicerol) – Glicolagem.....                                                                 | 24 |
| 1.3.3.5 | Aquecimento da amostra (Calcinagem).....                                                                                     | 25 |
| 2       | <b>CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO.....</b>                                                                              | 30 |
| 2.1     | <b>Bacia do Paraná – Formação Ponta Grossa.....</b>                                                                          | 30 |
| 2.2     | <b>Membro Jaguariaíva.....</b>                                                                                               | 38 |
| 3       | <b>TRABALHOS ANTERIORES REALIZADOS NOS POÇOS<br/>PALEOSUL 03-JA-PR E PALEOSUL 02-RV-MS.....</b>                              | 42 |
| 3.1     | <b>Poço PALEOSUL 03-JA-PR.....</b>                                                                                           | 42 |
| 3.2     | <b>Poço PALEOSUL 02-RV-MS.....</b>                                                                                           | 43 |
| 3.3     | <b>Estudos faciológicos.....</b>                                                                                             | 51 |
| 4       | <b>ANÁLISE MICROFACIOLÓGICA DO MEMBRO JAGUARIAÍVA<br/>COM BASE NOS POÇOS PALEOSUL 03-JA-PR E PALEOSUL 02-<br/>RV-MS.....</b> | 53 |
| 4.1     | <b>DADOS PETROGRÁFICOS.....</b>                                                                                              | 53 |
| 4.1.1   | <u>Classificação das amostras.....</u>                                                                                       | 53 |
| 4.1.2   | <u>Descrição petrográficas das amostras do Poço PALEOSUL 03-JA-PR.....</u>                                                   | 57 |
| 4.1.2.1 | LÂMINA PR-30,50.....                                                                                                         | 57 |
| 4.1.2.2 | LÂMINA PR-35,90.....                                                                                                         | 58 |
| 4.1.2.3 | LÂMINA PR-42,60.....                                                                                                         | 59 |

|          |                                                                                                             |     |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1.2.4  | LÂMINA PR-56,83.....                                                                                        | 60  |
| 4.1.2.5  | LÂMINA PR-80,84.....                                                                                        | 60  |
| 4.1.2.6  | LÂMINA PR-101,46.....                                                                                       | 61  |
| 4.1.2.7  | LÂMINA PR-101,55.....                                                                                       | 62  |
| 4.1.2.8  | LÂMINA PR-108,19.....                                                                                       | 63  |
| 4.1.2.9  | LÂMINA PR-120,10.....                                                                                       | 64  |
| 4.1.3    | <u>Microscopia Eletrônica de Varredura nos folhelhos do poço PALEOSUL 03-JA-PR.....</u>                     | 64  |
| 4.1.4    | <u>Descrição petrográficas das amostras do Poço PALEOSUL 02-RV-MS.....</u>                                  | 68  |
| 4.1.4.1  | LÂMINA MS-13,15.....                                                                                        | 68  |
| 4.1.4.2  | LÂMINA MS-13,30.....                                                                                        | 69  |
| 4.1.4.3  | LÂMINA MS-13,95.....                                                                                        | 70  |
| 4.1.4.4  | LÂMINA MS-15,30.....                                                                                        | 71  |
| 4.1.4.5  | LÂMINA MS-16,00.....                                                                                        | 71  |
| 4.1.4.6  | LÂMINA MS-22,75.....                                                                                        | 72  |
| 4.1.4.7  | LÂMINA MS-33,90.....                                                                                        | 72  |
| 4.1.4.8  | LÂMINA MS-36,00.....                                                                                        | 73  |
| 4.1.4.9  | LÂMINA MS-39,60.....                                                                                        | 74  |
| 4.1.4.10 | LÂMINA MS-43,50.....                                                                                        | 75  |
| 4.1.4.11 | LÂMINA MS-48,00.....                                                                                        | 76  |
| 4.1.4.12 | LÂMINA MS-51,80.....                                                                                        | 77  |
| 4.1.4.13 | LÂMINA MS-56,15.....                                                                                        | 77  |
| 4.1.4.14 | LÂMINA MS-59,75.....                                                                                        | 78  |
| 4.1.5    | <u>Microscopia Eletrônica de Varredura nos folhelhos do poço PALEOSUL 02-RV-MS.....</u>                     | 79  |
| 4.1.6    | <u>SÍNTESE DAS MICROFÁCIES.....</u>                                                                         | 81  |
| 5        | <b>ANÁLISE QUALITATIVA DO MEMBRO JAGUARIAÍVA COM BASE NOS POÇOS PALEOSUL 02-RV-MS E PALEOSUL 03-JA-PR..</b> | 88  |
| 5.1      | <b>Difratometria de Raios X nas amostras do poço PALEOSUL 03-JA-PR..</b>                                    | 88  |
| 5.2      | <b>Difratometria de Raios X nas amostras do poço PALEOSUL 02-RV-MS</b>                                      | 95  |
| 6        | <b>DISCUSSÕES .....</b>                                                                                     | 104 |
| 6.1      | <u>Análise microfaciológica.....</u>                                                                        | 104 |
| 6.2      | <u>Análise qualitativa e implicações genéticas.....</u>                                                     | 109 |

|     |                                                                    |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.3 | <u>Influência dos argilominerais em sistemas petrolíferos.....</u> | 112 |
|     | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                            | 117 |
|     | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                           | 120 |

## INTRODUÇÃO

As grandes reservas brasileiras de óleo e gás encontram-se posicionadas nas bacias de Campo e Santos. Em quase sua totalidade o complexo produtivo estabelecido nas bacias marginais brasileiras tem se dedicado à pesquisa e desenvolvimento sobre hidrocarbonetos obtidos a partir de jazidas convencionais de óleo e gás. Esse tipo de jazida envolve as ocorrências de hidrocarbonetos geradas a partir da maturação normal dos sedimentos ricos em matéria orgânica em função da história de soterramento das bacias sedimentares. No entanto, quando observamos as demais bacias brasileiras, sobretudo as bacias paleozoicas, que abrangem quase 30% do território nacional, o modelo de geração convencional de petróleo nem sempre se aplica. Nessas bacias a geração de petróleo envolve um processo de geração considerado como não convencional (quando os horizontes geradores sofrem maturação térmica devido a intrusões ígneas, ou também os hidrocarbonetos gerados a partir de *gas shale* (folhelhos gaseíferos) e de *oil shale* (folhelho pirobetuminoso). Os parâmetros importantes para a análise sistemática da geração não convencional incluem o tipo de matéria orgânica e abundância, extensão vertical e lateral, profundidade de soterramento (afetando a temperatura do reservatório, pressão e maturidade térmica) e porosidade. A composição mineralógica também é uma variável chave para determinar o potencial do *gas shale* porque influencia a gênese do fraturamento e projeta para estimulação de fraturas posteriores (MANGER et al., 1991).

Os argilominerais são ubíquos nas rochas geradoras de petróleo e gás. Durante a idade precoce (1940) da exploração mundial de petróleo, argilominerais foram estudados para prever a qualidade da matéria orgânica, rocha fonte e mecanismos de geração (GRIM, 1947, BROOKS, 1952). Em seguida, a análise de argilominerais foi utilizada como ferramenta em termos de determinação, correlação estratigráfica e identificação da zona de geração para encontrar o intervalo alvo de exploração. Na década de 1970, os argilominerais começaram a ser amplamente estudados para diagênese e previsão da qualidade do reservatório devido à aplicação de análises petrológicas e análise quantitativa mineralógica por difração de raios X. Desde 1980, a análise de argilominerais tem sido usada para determinar o tempo de geração e a análise do sistema petrolífero. Estes progressos intermitentes de pesquisa de minerais de argila são o resultado do aumento das explorações petrolíferas (JIANG, 2012).



As técnicas e ferramentas modernas para a caracterização quantitativa e qualitativa de nano-poros e mineralogia dos folhelhos criou uma nova era nos estudos de argilominerais para facilitar a pesquisa e exploração de reservatórios não-convencionais.

As jazidas não convencionais têm sido objeto de pesquisa na Faculdade de Geologia da UERJ (FGEL) há alguns anos. O presente trabalho vem se somar aos esforços em desenvolvimento na Instituição para a avaliação do potencial gerador da Bacia do Paraná. Esses esforços estão concentrados atualmente no âmbito do INOG – Instituto Nacional de Óleo e Gás – Jazidas não convencionais, sediado na UERJ. Nesse Instituto, que congrega diferentes aspectos relacionados à exploração, produção, refino, regulação e ao meio ambiente, há uma linha específica de pesquisa de *shale gas*, na qual a presente proposta está inserida.

## 1 A ÁREA DE ESTUDOS, OBJETIVOS E MÉTODOS

O gás natural proveniente de reservatórios não convencionais representa desde 2000 um atrativo para a indústria mundial de petróleo. Nos últimos anos, a participação do gás natural em matrizes energéticas aumentou de forma significativa em diversos países (VICHI E MANSOR, 2009).

Além das reservas convencionais, os recentes avanços tecnológicos estão permitindo o desenvolvimento e a viabilidade de extração de gás natural de fontes não convencionais. A principal fonte de gás oriundo de reservatório não convencional é denominado de *shale gas* (gás natural produzido a partir de rochas de granulação fina como: siltitos, folhelhos, etc.). Este recurso está mudando as perspectivas de incremento da oferta de gás e também sua distribuição geográfica, uma vez que os recursos de gás não convencional possuem uma distribuição mais uniforme e menos concentrada do que os recursos de gás convencional. Atualmente, o aumento da produção do *shale gas* pode mudar o mercado de energia no mundo e, conseqüentemente, torná-lo a principal fonte de energia não renovável.

O gás natural não convencional, por definição, é o gás presente em formações rochosas de baixa permeabilidade, portanto, de difícil acesso, requerendo tecnologias especiais de extração. No Brasil, ocorre grande potencial para estes reservatórios de gás não convencional nas bacias do São Francisco, Recôncavo, Parnaíba e Paraná.

### 1.1 Área de estudo

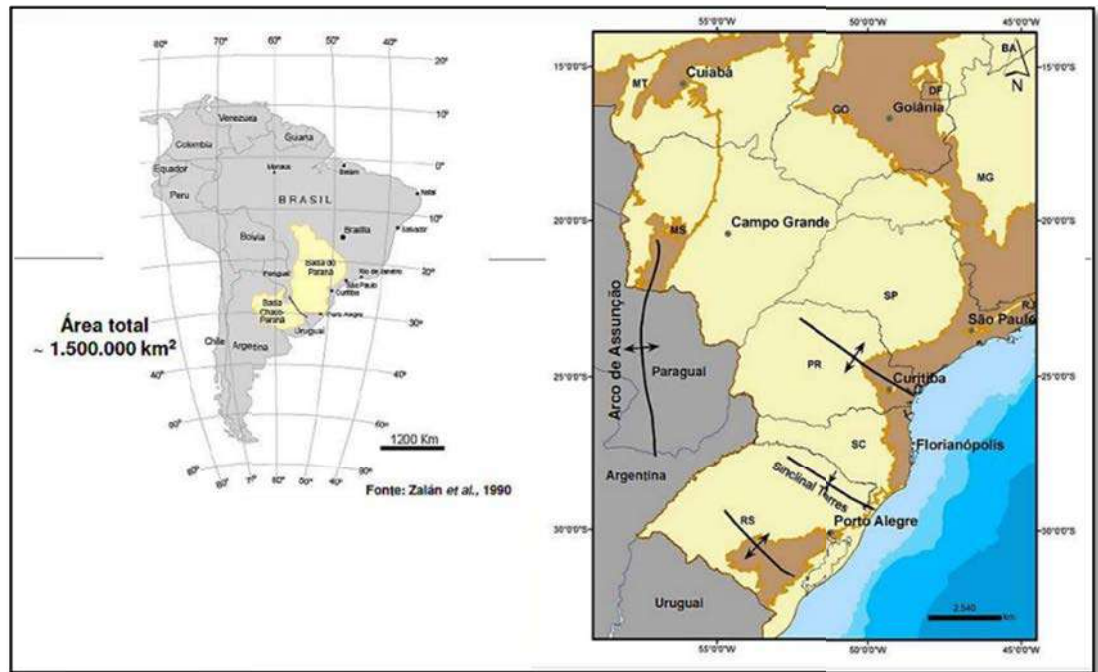
A Bacia do Paraná estende-se desde o centro-sul do Brasil até o norte do Uruguai, nordeste da Argentina e leste do Paraguai. Ela tem uma área aproximada de  $1,5 \times 10^6$  de  $\text{km}^2$ , sendo que cerca de  $1,1 \times 10^6$   $\text{km}^2$  em território brasileiro, englobando parte dos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul (Figura 1).

O Devoniano da Bacia do Paraná está representado pelo Grupo Paraná, que compreende as formações Furnas e Ponta Grossa. A Formação Ponta Grossa é constituída, da base para o topo, por três membros: Jaguariaíva, Tibagi e São Domingos. O Membro Jaguariaíva, apresenta em sua porção superior folhelho preto laminado, carbonoso, que

constitui um potencial gerador de hidrocarbonetos gasosos em toda sua área de ocorrência (MILANI et al. 1994).

Nesse sentido, a realização de estudos geológicos, petrográficos e mineralógicos nos folhelhos do Membro Jaguariaíva assume grande importância no atual cenário econômico e tecnológico brasileiro, fomentando uma reavaliação do seu potencial como gerador de gás.

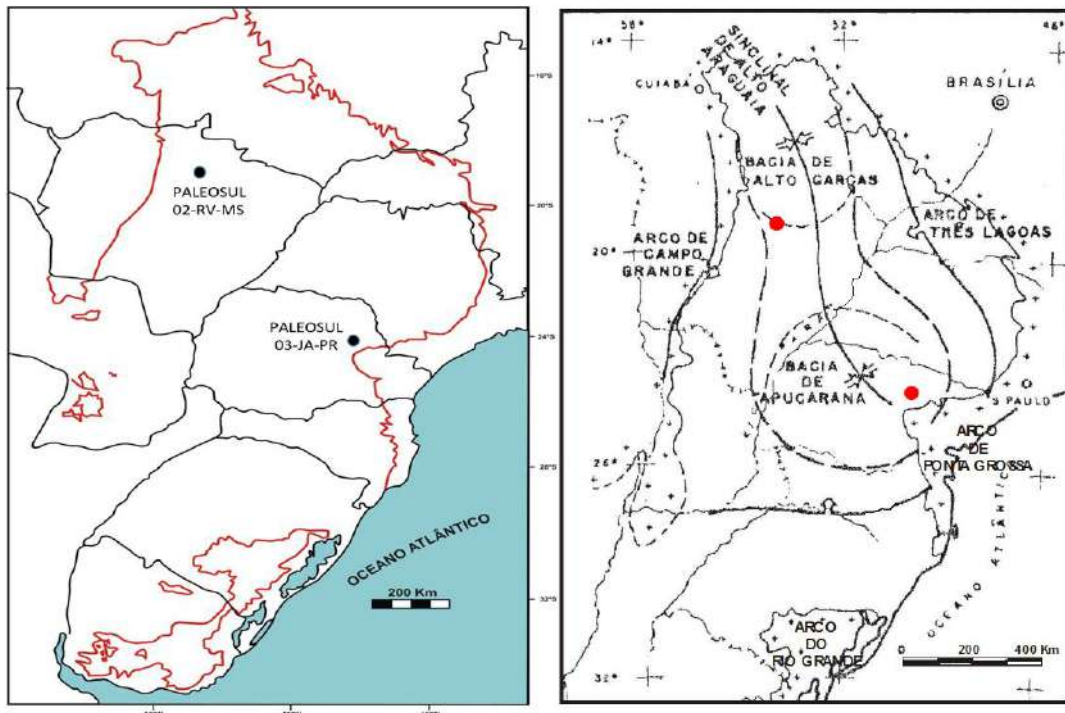
Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Paraná.



Fonte: Zalán et al. 1990.

As amostras utilizadas neste trabalho foram coletadas a partir de testemunhos de duas sondagens feitas pelo projeto PALEOSUL (UERJ). O poço 03-JA-PR está localizado no município de Jaguariaíva, borda leste do estado do Paraná (Sub-bacia de Apucarana), e o poço 02-RV-MS foi perfurado no município de Rio Verde de Mato Grosso (MS), na porção norte do estado do Mato Grosso do Sul (Sub-bacia de Alto Garças) (Figura 2).

Figura 2 – Localização dos Poços PALEOSUL 03-JA-PR e PALEOSUL 02-RV-MS.



Legenda: Mapa à esquerda: Localização do poço PALEOSUL 03-JA-PR no município de Jaguariaíva, borda leste do estado do Paraná e o do poço PALEOSUL 02-RV-MS situado na porção norte do estado do Mato Grosso do Sul. À direita, Mapa paleotectônico do Devoniano mostrando as sub-bacias de Apucarana e Alto Garças

Fonte: adaptado de RAMOS, 1970.

## 1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo principal realizar análise qualitativa da porção mais argilosa do Membro Jaguariaíva, por meio de difratometria de raios X, bem como a caracterização petrográfica, visando à classificação desses litotipos. Dessa forma, comparações entre os dois poços estudados permitem análises sobre as condições de sedimentação dessas rochas argilosas durante o Devoniano Inferior para as duas Sub-bacias da Bacia do Paraná.

Embora ocorram numerosos estudos geológicos na Formação Ponta Grossa da Bacia do Paraná, até agora, relativamente poucos trabalhos foram realizados sobre o detalhamento das rochas devonianas do Membro Jaguariaíva, sob a ótica da mineralogia e da caracterização de argilominerais. Este trabalho visa caracterizar o folhelho e o papel dos argilominerais sob o ponto de vista de paleoambiente, diagênese e correlação com trabalhos anteriores que versam sobre a estratigrafia, história térmica e maturação da matéria orgânica.

Esta caracterização e correlação são fundamentais para que se possa caracterizar corretamente a rocha geradora do Membro Jaguariaíva da Formação Ponta Grossa e a partir daí, aplicar os dados em futuros estudos exploratórios.

### 1.3 Material e métodos

A seguir serão descritos os métodos utilizados para a fase de preparação de amostras referentes à Petrografia, Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) e a Difractometria de raios X (DRX).

#### 1.3.1 Petrografia

As análises petrográficas das rochas foram realizadas com base nas descrições de 24 lâminas delgadas de rochas microclásticas dos poços PALEOSUL 02-RV-MS, PALEOSUL 03-JA-PR, ambas referente ao Membro Jaguariaíva. Foi utilizado como principal critério de escolha das amostras os valores de Carbono Orgânico Total (COT) presentes no material argiloso, obtidos por meio da revisão de trabalhos anteriores e da base de dados do Projeto Paleosul.

As lâminas foram confeccionadas por técnicos do Laboratório Geral de Processamento de Amostras (LGPA) da UERJ. Estas lâminas delgadas foram analisadas em: microscópio Zeiss® LAB A1, no qual as amostras foram fotografadas por câmera digital; Microscópio Zeiss® LAB A2m o qual as imagens foram obtidas em *software* do próprio aparelho. Ambos os microscópio possuíam luz transmitida paralela e refletida.

Os dados sedimentológicos e icnológicos foram obtidos durante o detalhamento para descrição da textura e trama das rochas, mas particularmente, a proporção (argila:silte:areia), a organização sedimentar da lâmina, a presença e identificação dos icnofósseis, as microestruturas e orientação das micas, associado à composição mineralógica.

Para uma melhor quantificação da rocha foi realizado a contagem de 200 pontos (de forma aleatória) em cada lâmina, para determinação granulométrica e composicional, obtendo-se também uma relação da percentagem de poros para cada lâmina. Com base nos

valores encontrados, as amostras foram plotadas no diagrama de Picard (1971) que ilustra a relação entre areia, silte e argila.

Alguns dados icnológicos foram semiquantitativos. O grau de bioturbação do substrato é dado pelo índice de bioturbação, determinado a partir do tipo de fábrica primária presente, da abundância de escavações/perfurações e de seu grau de superposição.

A intensidade de bioturbação nas amostras foi avaliada através de uma escala de abundância sugerida por Olivero (1994). De acordo com a intensidade de bioturbação, foram separadas em seis classes distintas.

Classe 0 = *Bioturbação ausente.*

Classe 1 = *Muito rara (<10% de bioturbação no setor).*

Classe 2 = *Rara (de 10 – 30%).*

Classe 3 = *Comum (por volta de 50%).*

Classe 4 = *Densa. Perfurações preenchem a superfície por volta de 70%.*

Classe 5 = *Totalmente bioturbada. Não é possível observar nenhum vestígio da organização interna inicial da rocha.*

Visando facilitar a sistematização do texto, foi utilizada a seguinte nomenclatura na descrição das Fotomicrografias: LT – figura com luz transmitida, NX – nicóis cruzados, N// - nicóis paralelos, 1,25X - aumento 1,25 vezes; 2,5X - aumento 2,5 vezes; 5X - aumento 5 vezes; 10X - aumento 10 vezes; 20X - aumento 20 vezes.

### 1.3.2 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Os ensaios de microscopia foram realizados no microscópio eletrônico de varredura (MEV) no Laboratório de Microscopia do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), equipado com sistema de microanálise por dispersão de energia (EDS), marca Leica, modelo S440.

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiu observar as amostras com grande aumento e resolução das imagens, possibilitando a descrição direta da laminação, textura, orientação e superfície dos minerais. Esta técnica é possível acoplar o analisador EDS (“Energy Disperse Spectrometry”), que identifica a constituição química do material em pontos selecionados da amostra fornecendo dados semiquantitativos. A MEV e EDS complementarão grandemente os estudos de microscopia ótica e difratometria de raios X.

### 1.3.3 Difratometria de Raios X

Tendo por base a difração dos raios X pelos planos atômicos (ou iônicos) dos cristais, a difratometria de raios X permite a caracterização das estruturas cristalinas e, a partir delas, a identificação dos minerais (BRINDLEY, 1980; MOORE & REYNOLDS, 1989). Esta é a técnica mais adequada para a definição da composição mineral em sedimentos finos, principalmente na caracterização dos argilominerais, dadas as suas ínfimas dimensões, em geral  $< 4 \mu\text{m}$  (Tabela 1).

As amostras dos poços estudados foram quarteadas e moídas até a granulometria argila a fim de permitir a caracterização mineralógica por difratometria de raios X (DRX), método do pó. Estas foram realizadas por um equipamento Bruker-D4 Endeavor, nas seguintes condições de operação: radiação  $\text{Co K}\alpha$ ,  $\lambda = 0,179021 \text{ nm}$ , gerador operado a 40 kV e 40 mA; velocidade do goniômetro de  $0,02^\circ 2\theta$  por passo com tempo de contagem de 0,5 segundos por passo, entre  $4$  e  $80^\circ 2\theta$ , com detector sensível à posição LynxEye. As interpretações qualitativas de espectros foram efetuadas por comparação com padrões contidos no banco de dados ICDD-2006 (International Centre for Diffraction Data - PDF-2 Powder Diffraction File, Newton Square, PA) do software Bruker DiffracPlus. As análises por DRX foram realizadas no Setor de Caracterização Tecnológica (SCT) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM-RJ). A nomenclatura dos argilominerais utilizada nesta tese segue os padrões ortográficos adotados por Branco (2014).

Visando qualificar os argilominerais na rocha foi preciso realizar a retirada da matéria orgânica e do carbonato da seguinte maneira:

#### 1.3.3.1 Eliminação da matéria orgânica

A matéria orgânica presente nas amostras é eliminada através do peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) a 10 % (Figura 3). Sua porcentagem é determinada através da diferença do peso da amostra inicial e peso da amostra depois da eliminação da matéria orgânica.

Procedimento:

- a) Colocar um pouco de água no Becker até cobrir a amostra

- b) Colocar o Becker na chapa aquecedora a 70°C
- c) Esperar a amostra aquecer
- d) Colocar 5 ml de peróxido de hidrogênio na amostra
- e) Agitar a amostra com bastão de vidro para evitar a subida do nível da amostra ocasionada pela reação da amostra com peróxido
- f) Repetir a adição do peróxido na amostra até que não ocorra mais reação

Lavagem:

A amostra deve ser lavada para a retirada do reagente da seguinte maneira:

- a) Colocar água destilada no Becker de 1000 ml onde está contida a amostra até a marca de 900 ml.
- b) Esperar 24h para decantação da amostra, até que a coluna de água não apresente mais sólidos em suspensão.
- c) Retirar a água destilada

Fazer o procedimento de lavagem três vezes.

Secagem:

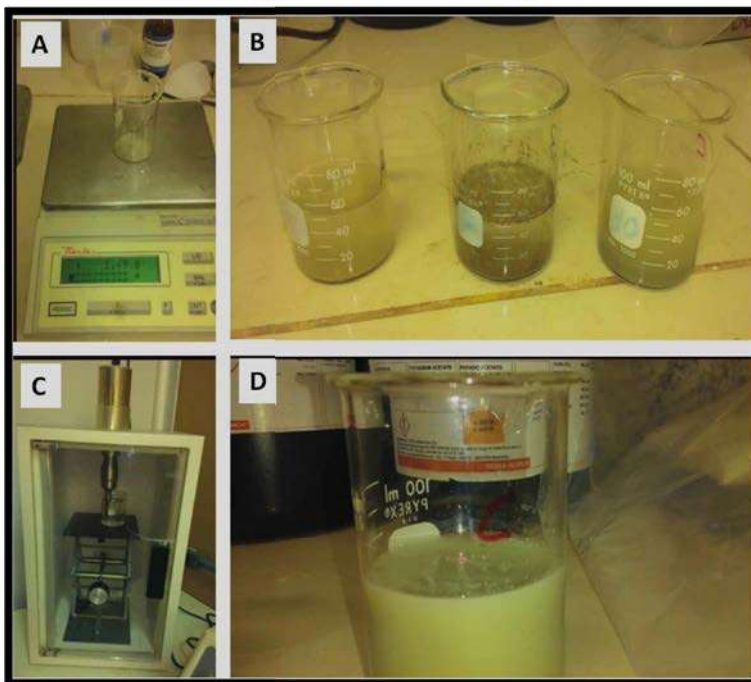
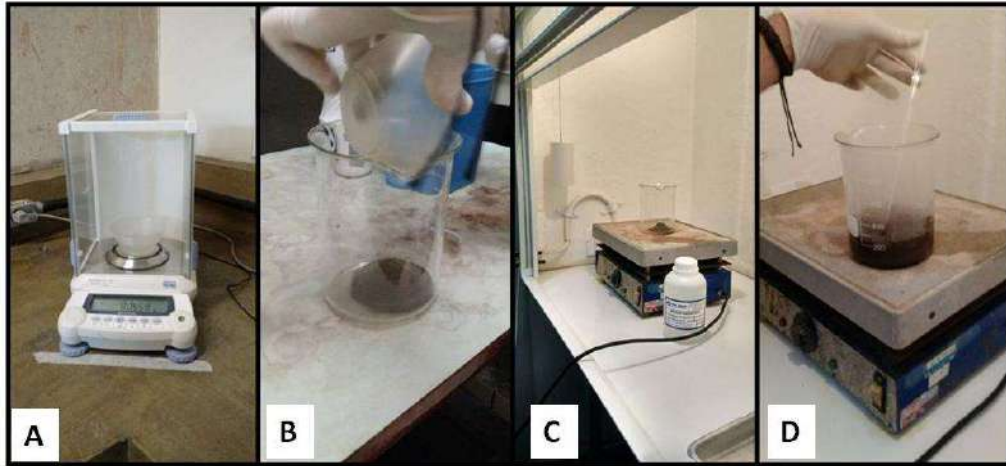
Colocar as amostras em estufa a temperatura de 40 °C

Pesagem:

Realizar nova pesagem para saber quantidade matéria orgânica eliminada.

Figura 3 – Método para eliminação da matéria orgânica.





Legenda: Eliminação da matéria orgânica. A) Pesagem, B) Adição do Peróxido de hidrogênio, C) Uso da chapa aquecedora, D) Eliminação da matéria orgânica.

Fonte: A autora, 2017.

### 1.3.3.2 Eliminação do carbonato

A eliminação do carbonato é feita através da adição de ácido clorídrico (HCl).

Procedimento:

- a) Colocar a amostra no Becker e adicionar 5 ml de ácido e agitar com bastão de vidro
- b) Repetir a adição de ácido na amostra até que não ocorra mais reação

Lavagem:

A amostra deve ser lavada para a retirada do reagente da seguinte maneira:

- a) Colocar água destilada no Becker de 1000 ml onde está contida a amostra até a marca de 900 ml.
- b) Esperar 24h para decantação da amostra, até que a coluna de água não apresente mais sólidos em suspensão.
- c) Retirar a água destilada
- d) Fazer o procedimento de lavagem 5 vezes.

Secagem:

Colocar as amostras em estufa a temperatura de 40 °C

Pesagem:

Realizar nova pesagem para saber quantidade de carbonato eliminado.

### 1.3.3.3 Pipetagem

Após a retirada da matéria orgânica e carbonato este procedimento é realizado com finalidade de fazer a separação dos argilominerais (Figura 4).

Procedimento:

- a) Pesar 1,5 g de argila seca (Figura 4A).
- b) Colocar o material pesado num Becker de 50 ml com água destilada. (Figura 4B).
- c) Adicionar 2 gotas de hexametáfosfato de sódio a 0,5%.
- d) Agitar a suspensão em ultrassom por 1 minuto (Figura 4C).
- e) Deixar a suspensão em repouso durante 20 minutos (Figura 4D).
- f) Com o auxílio de uma pipeta retirar a fração fina da suspensão por 48 h evitando perturbação da mesma e coleta do material grosseiro depositado.
- g) Retirar com a pipeta 3,0 ml da suspensão preparada e homogeneizada e depositar cuidadosamente sobre uma lâmina

de vidro (as dimensões da lâmina devem ser compatíveis com o porta-amostra utilizado no difratômetro)

- h) Secar a lâmina em temperatura ambiente.

Ocasionalmente, com os dados da reflexão principal, não é possível determinar com segurança o argilomineral presente. Nestes casos, recomenda-se a utilização dos procedimentos de glicolagem e aquecimento, descritos a seguir (Figura 4).

#### 1.3.3.4 Solvatação com etilenoglicol (ou glicerol) – Glicolagem

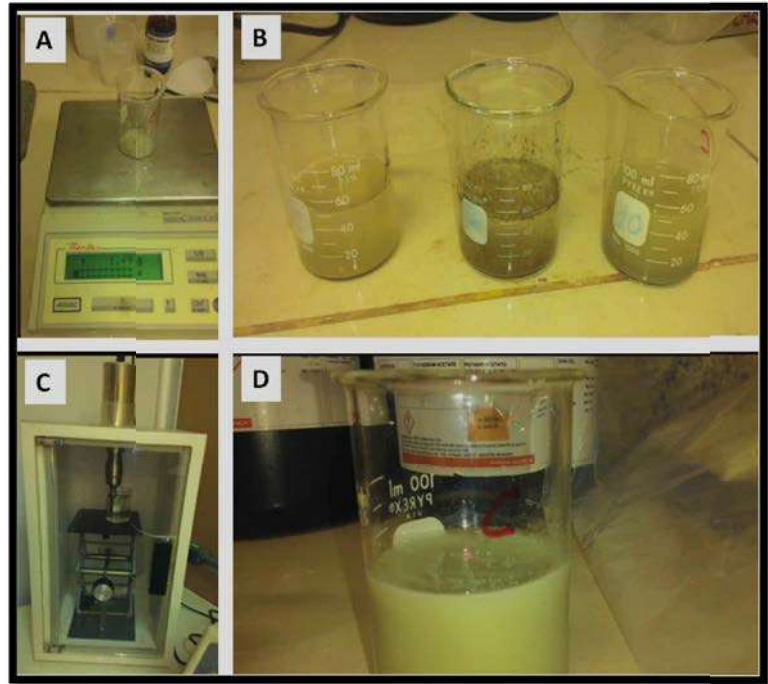
- a) Preparar uma lâmina seguindo o procedimento geral (pode-se empregar a mesma lâmina utilizada anteriormente).
- b) Posicionar a lâmina sobre um suporte dentro de um recipiente com tampa (o suporte servirá para que a lâmina não fique apoiada no fundo do recipiente).
- c) Adicionar 100 ml de etilenoglicol (ou glicerol) no fundo do recipiente, impedindo o contato direto do reagente com a lâmina.
- d) Tampar o recipiente durante 12 h.
- e) Retirada a lâmina da estufa, proceder ao ensaio de difração de raios X
- f) Verificar o deslocamento dos picos em relação ao ensaio anterior

#### 1.3.3.5 Aquecimento da amostra (Calcinagem)

- a) Preparar uma lâmina seguindo o procedimento geral
- b) Colocar a lâmina em uma mufla, aquecendo-a a 400 °C mantendo por 30 minutos.

- c) Retirada a lâmina da mufla, proceder ao ensaio de difração de raios X, varrendo-se de 2 a 15° (escala 2 $\theta$ ) com velocidade de 1°/min.
- d) Verificar o deslocamento dos picos em relação ao ensaio anterior.

Figura 4 - Processo de preparação das amostras.



Legenda: A) Pesagem, B) Preenchimento com água destilada, C) Agitação com ultrassom, D) Decantação  
 Fonte: A autora, 2017.

Quando se faz o tratamento térmico a 400°C eliminam-se as moléculas de água existentes entre as camadas dos argilominerais esmectita e vermiculita fazendo com que a distância interplanar basal destes seja reduzida para 10 Å, mesmo valor do argilomineral illita. Isso faz com que o pico referente à illita seja mais intenso. A clorita possui a propriedade de não sofrer alteração com o aquecimento. Desta forma, com a presença de clorita no folhelho, o pico de 6°, ou distância interplanar basal de 14 Å, não se altera (NEVES, 1968).

Assim, a diferenciação entre a clorita e vermiculita é feita pelo aquecimento: as cloritas apresentam intensificação do pico as 14 Å, enquanto as vermiculitas perdem o pico a 14 Å e apresentam uma banda a 9 Å no caso das vermiculitas trioctaédricas e de 10-11 Å nas vermiculitas dioctaédricas (SANTOS, 1989; NEVES, 1968).

A caulinita apresenta a distância interplanar basal de 7,1-7,2 Å. A glicolagem não provoca alterações e os padrões de difração desaparecem totalmente após o aquecimento a 500° C (NEVES, 1968).

O tratamento com etilenoglicol foi realizado para verificar a presença de esmectita ou vermiculita. Quando se coloca o material em análise em um ambiente fechado cujo vapor esteja saturado com esta substância, as moléculas de água do argilomineral esmectita são substituídas pelo etilenoglicol. Esta substituição provoca um aumento da distância interplanar basal de 14Å para 17 Å. Este efeito não é observado no caso do argilomineral vermiculita que não apresenta mudança interplanar.

A illita é caracterizada por picos intensos a 10 Å que permanecem inalterados, pela solvatação em etilenoglicol e aquecimento como pode ser observado em todas as amostras (NEVES, 1968).

A pirofilita tem baixa absorção e alta cristalinidade e, portanto, produz reflexões basais distintas de 9,6 Å, 19,4 Å e 29,6 Å e a glicolagem não provoca alterações (NEVES, 1968).

A montmorillonita é um mineral a três *camadas*, no qual Mg substitui Al em proporção diferente de 3:2, de modo que ocorre um déficit de carga para ser compensado pela admissão de cátions hidratados entre os *pacotes*, formando um leito d'água que os separa.

Como não é constante a espessura destes leitos d'água, ou seja, o grau de hidratação do mineral, a difração principal da montmorillonita, de 12 a 14 Å, oferece geralmente aparência difusa, num pico largo que lembra os minerais interestratificados. Uma difração entre 4,6 e 4,5 Å é a mais importante depois da difusa (NEVES, 1968).

A presença de minerais interestratificados é marcada pela presença de picos achatados e largos. Se existem pacotes invariáveis do tipo 10 Å, junto com expansíveis, o pico, no difratograma da montagem glicolada, não deixará de começar em 10 Å, mas deverá aparecer mais baixo (NEVES, 1968; HOSTERMAN & WHITLOW, 1983).

Os minerais interestratificados são formados por diferentes tipos de argilas alternadas. A mistura ou interestratificação pode ser regular (ordenado ou segregado) ou ao acaso (REYNOLDS, 1980; WILSON, 1987).

As estruturas interestratificadas ao acaso (*randomly*), por exemplo: illita/clorita, identificadas pelos picos de difração entre 10 e 14Å (NEVES, 1968).

A corrensita é bem conhecida como a variedade trioctaédrica regular (ou camada mista) de clorita/esmectita ou clorita/vermiculita (BAILEY 1982). Apresenta distância

interplanar a 14Å natural que expande a 15Å em etilenoglicol e colapsa a 12Å quando aquecida (GAVIRIA et al.; 2012).

Tabela 1 - Posições referentes aos picos principais (direção (001) dos argilominerais em condições normais (N), após glicolagem (G) e aquecimento ou calcinação (A):

| Distância Interplanar (Å)<br>(condições normais - N) | Distância Interplanar (Å)<br>(após glicolagem - G) | Distância Interplanar (Å)<br>(após aquecimento - A) | Argilominerais       |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------|
| 7                                                    | 7                                                  | -                                                   | Caulinita            |
| 10                                                   | 10                                                 | 10                                                  | Illita               |
| 14                                                   | 14                                                 | 14                                                  | Clorita              |
| 14                                                   | 17                                                 | 14                                                  | Clorita expandível   |
| 12                                                   | 17                                                 | 10                                                  | Montmorillonita – 12 |
| 14                                                   | 17                                                 | 10                                                  | Montmorillonita – 14 |
| 14                                                   | 14                                                 | 10                                                  | Vermiculita          |

Fonte: Santos, 1989.

Os principais argilominerais são agrupados em cinco grupos sistemáticos, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação sistemática dos argilominerais cristalinos.

| <b>Arranjo das camadas e Grupo</b> | <b>Exemplos de espécies</b>                                                                  |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2:1<br>Talco                       | <u>talco</u> : $Mg_3 Si_4 O_{10} (OH)_2$                                                     |
|                                    | <u>pirofilita</u> : $Al_2 Si_4 O_{10} (OH)_2$                                                |
| 2:1<br>Esmectita                   | <u>hectorita</u> :<br>$E^{+}_{0,33}(Mg_{2,67}Li_{0,33})Si_4O_{10}(OH)_{2n}H_2O$              |
|                                    | <u>Montmorillonita</u> :<br>$E^{+}_{0,33}(Al_{1,67}Mg_{0,37})Si_4O_{10}(OH)_{2n}H_2O$        |
| 2:1<br>Vermiculita                 | <u>Vermiculita</u><br>$K(Al, Li)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2$                                    |
|                                    | <u>Vermiculita</u><br>$E^{+}_{0,86}(MgFe^{+2}, Fe^{+3}Al)_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_{2n}H_2O$      |
| 2:1<br>Mica                        | <u>lepidolita</u> : $K(Al, Li)_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2$                                        |
|                                    | <u>illita</u> : $K(Al, Li)_3(SiAl)_4O_{10}(OH)_2$                                            |
| 2:1<br>Clorita                     | <u>Grupo da clorita</u><br>$(Mg, Fe, Al)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot (Mg, Fe, Al)_3(OH)_2$ |
| 1:1<br>Caulinita                   | <u>caulinita</u> : $Al_2Si_2O_5(OH)_4$                                                       |

Fonte: Neves, 1968

Diagênese refere-se aos processos e às mudanças (geralmente excluindo a troca de cátions) que ocorrem nos sedimentos após a deposição controlados pelo incremento da temperatura e da pressão devido ao progressivo soterramento, bem como pela química da água intersticial nos poros, que levam à litificação da rocha (Burley & Worden, 2003). Contudo, as definições dos processos variam amplamente sobre quais mudanças, e que parte (ou todas) que ocorreram entre o transporte do sedimento e o tempo em que o sedimento é estudado (BJØRLYKKE, K., 1998)

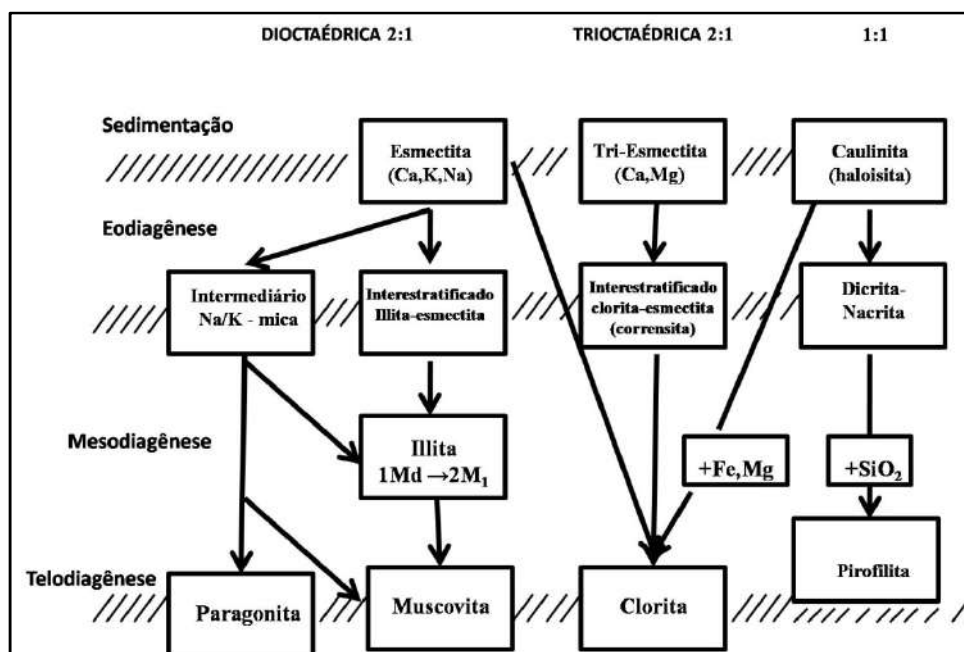
Os termos eodiagênese, mesodiagênese e telodiagênese foram definidos como processos diagenéticos que ocorrem em intervalos de tempo e profundidades relativamente definido (Choquette & Pray, 1970).

Segundo Morad *et al.*, 2000 a eodiagênese inclui todos os processos que ocorrem próximos da superfície sob a influência direta de água meteórica e água do mar em profundidades rasas e temperaturas baixas, consideradas entre 30°C e 70°C. A mesodiagênese é o estágio onde ocorrem reações envolvendo águas de formação quimicamente evoluídas sob condições de soterramento efetivo e temperaturas relativamente mais elevadas, aproximadamente entre 70°C e 200°C. Em novas condições de pressão e temperatura, os minerais se tornam instáveis, buscando o equilíbrio e, conseqüentemente, produzindo minerais estáveis nestas novas condições. A telodiagênese descreve os processos relacionados ao soerguimento e nova exposição das rochas sedimentares às condições superficiais, ocasionando desestabilização dos minerais formados na mesodiagênese e nova readaptação dos minerais às novas condições.

Os argilominerais em folhelhos podem ser alterados durante a diagênese precoce ou tardia, e também no início da mesodiagênese. O principal processo físico pós-deposicional que afeta os folhelhos como um todo é a compactação. O primeiro estágio de desidratação do folhelho ocorre durante a mesodiagênese precoce e o segundo estágio de desidratação ocorre na mesodiagênese tardia. Durante a telodiagênese, ocorre grande quebra da matéria orgânica (FOSCOLOST *et al.*; 1976)

A figura 5 demonstra as séries de reações dos argilominerais. As setas diagonais indicam a contribuição de uma série para outra. (MERRIMAN, 2002).

Figura 5 - Séries de reações dos argilominerais para cada zona diagenética.





## 2 CONTEXTO GEOLÓGICO E ESTRATIGRÁFICO

### 2.1 Bacia do Paraná – Formação Ponta Grossa

A Bacia do Paraná é uma vasta bacia intracratônica, que evoluiu sobre a Plataforma Sul Americana, registrando depósitos sedimentares desde o Ordoviciano até o Cretáceo. Cobrindo cerca de 1.600.000 km<sup>2</sup> na porção centro-leste do continente sul-americano, estende-se por quatro países: Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai. No Brasil, a área da bacia abrange os territórios dos Estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, e partes dos territórios de Minas Gerais e Goiás (ZALAN, 1990). No Paraná, compreende o Segundo e o Terceiro Planalto, recobrando a maior porção do Estado. De acordo com Milani et al. (1994) e Milani et al (1997), o pacote sedimentar-magmático da Bacia do Paraná constitui-se de seis grandes sequências limitadas por expressivas discordâncias regionais: Ordovício-Siluriana, Devoniana, Carbonífera-Eotriássica, Neotriássica, Jurássica-Eocretácea e Neocretácea. O registro litoestratigráfico da Bacia do Paraná é constituído por grupos, os quais se encontram subdivididos em formações. Os grupos paleozóicos que caracterizam esta bacia são: Rio Ivaí (Ordoviciano-Siluriano), Paraná (Devoniano), Itararé (Permo-carbonífera), Guatá (Permiano), Passa Dois (Permiano Superior) (Figura 6).

O Grupo Paraná é caracterizado por sedimentos clásticos constituintes de uma sucessão arenosa basal e uma sucessão superior predominantemente pelítica, compreendendo, respectivamente, as formações Furnas e Ponta Grossa. Esta unidade foi proposta inicialmente por Moraes Rego (1931) como Série Paraná e posteriormente por Lange & Petri (1967) como Grupo Paraná.

A Formação Furnas é um pacote de arenitos de granulação média a grossa, geralmente com estratificação cruzada, destituídos de fósseis, com 343 m de espessura média. A base dessa unidade é constituída por depósitos fluviais, mas sua porção mais superior apresenta um aumento contínuo de material argiloso, evidenciando uma passagem transicional para os pelitos marinhos da Formação Ponta Grossa (LOBATO E BORGUI, 2004, MILANI et al.; 2007),

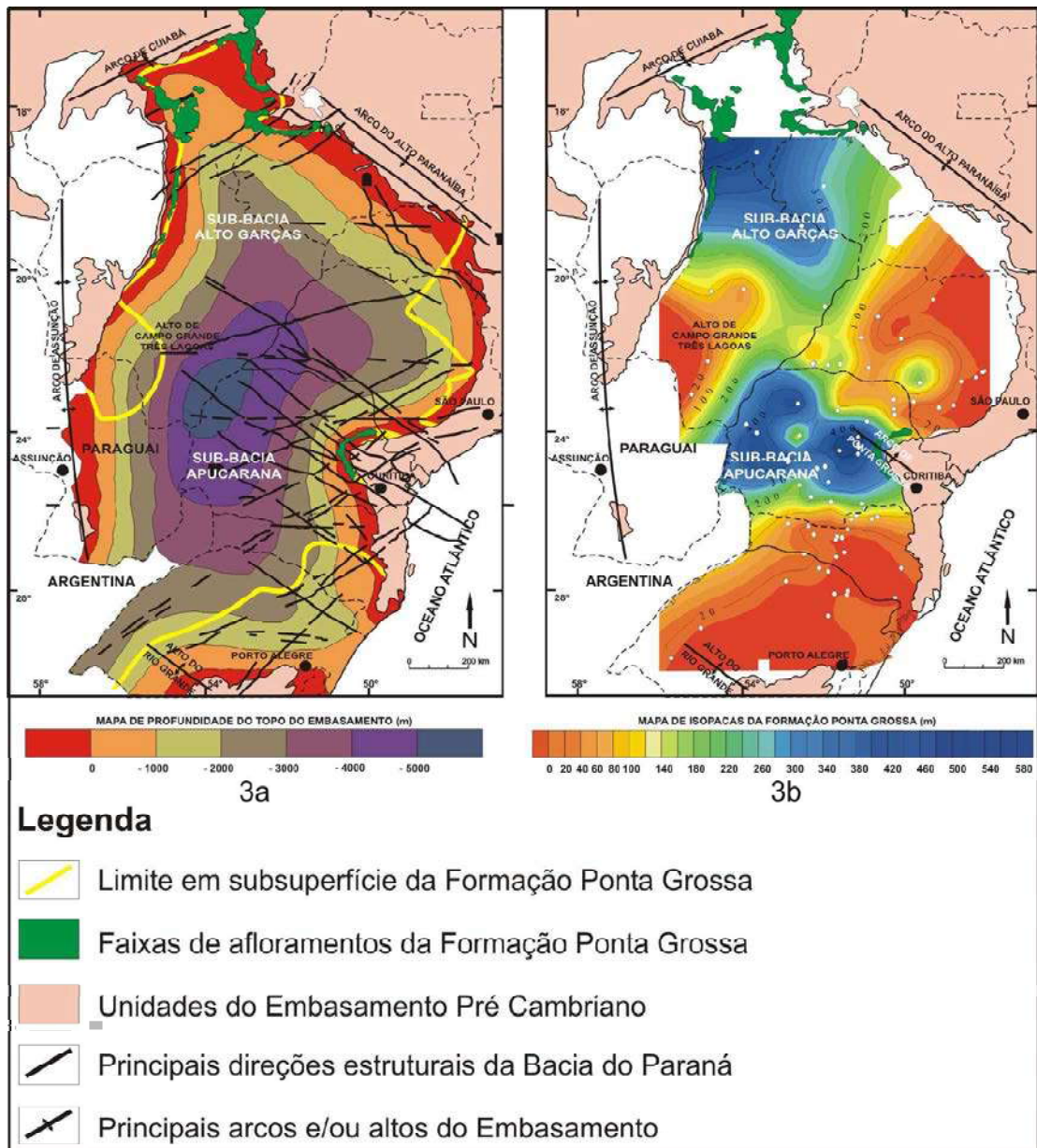
A Formação Ponta Grossa compreende uma sequência sedimentar de idade Praguiano-Frasniano (GRAHN et al, 2000, 2002); que aflora nos Estados do Paraná, Goiás e Mato

Grosso e é constituída por folhelho, folhelho síltico, siltito e arenito, com marcas onduladas e frequentemente bioturbado, indicando condições marinhas rasas predominantes durante sua deposição (SCHNEIDER et al., 1974). O clima durante a deposição desses sedimentos é considerado frio. As baixas temperaturas destas águas de plataforma são explicadas pela alta paleolatidade da área, que estaria aproximadamente entre 75 e 80°S segundo Gerrienne (1999). De fato os trabalhos mostram que as temperaturas das águas estariam mais frias no Devoniano Inferior durante a deposição da Formação Ponta Grossa (principalmente na porção sul). No entanto, Freitas-Brazil (2004) sugeriu que a presença de ooides de bertierina nos arenitos do Membro Tibagi (região de Don Aquino, MT) indicou temperatura maior das águas no Devoniano Superior. Este fato corroboraria com a hipótese do declínio da fauna Mavinocráfica (indicativa de águas frias) no Devoniano do Brasil a partir do Givetiano (MELO, 1988). Ainda de acordo com Melo (op. cit) a mortandade desta fauna teria sido causada por fontes marinhas quentes vindas do norte.

A Formação Ponta Grossa, conforme estabelecido por Lange & Petri (1967), encontra-se dividida em três membros: Jaguariaíva (base), de idade Praguiano- Emsiano, com constituição síltico-argilosa; Tibagi (idade Emsiano-Eifeliano), com arenito muito fino ou siltito arenoso; e São Domingos (topo), de idade Eifeliano-Neofameniano, com sedimento síltico argiloso e que tendem a cores escuras (DINO, 1999; QUADROS, 1999 APUD AZEVEDO et al., 2002). Os autores Grahn (1992); Grahn et al. (2000, 2010 e 2013); Gaugris & Grahn (2006); Mendlowicz Mauller et al. (2009) baseados na proposta original de Oliveira (1912) sugeriram a divisão litoestratigráfica do Siluro-Devoniano nas Formações Furnas (Pridoliano-Neo-Lochkoviano), Ponta Grossa (Neo-Praguiano/Eo-Emsiano) e São Domingos (incluindo o Membro Tibagi – Neo-Emsiano/Frasniano).



Figura 7 – Mapa do contorno estrutural e mapa de isópacas.



Legenda:a– Mapa de contorno estrutural do topo do embasamento, com as principais direções estruturais e a distribuição em subsuperfície e faixas de afloramentos da Formação Ponta Grossa, modificado de. Ramos (1970); Zalán et al. (1990); Assine et al. (1998). b– Mapa de isópacas da Formação Ponta Grossa com a divisão nas sub-bacias.

Fonte: Rezende 2007.

Tabela 3–Influência tectônica sobre a sedimentação da Formação Ponta Grossa nas Sub-bacias de Apucarana e de Alto Garças, descritas na literatura (continua)

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| NORTHFLEET et al. (1969)    | A Formação Ponta Grossa foi afetada pelo levantamento concomitante do Alto de Três Lagoas entre o Emsiano e o Givetiano, fato por eles deduzido a partir da não constatação dos andares Emsiano/Eifeliano em um poço estudado, onde, segundo os autores e Lange (1967), sedimentos de idade givetiana recobrem diretamente os arenitos da Fm.Furnas. Como indícios sedimentares desta movimentação tectônica, os autores, chamaram a atenção para a existência de arenitos lenticulares dentro dos folhelhos da Fm. Ponta Grossa em afloramentos no flanco sudeste da bacia (PR).                                                                                                                            |
| RAMOS (1970)                | Baseado no mapa de isópacas de Northfleet et al. (1969), que mostra dois depocentros, Ramos (1970) concluiu que houve notável controle tectônico durante a deposição da Fm. Ponta Grossa, que foi responsável pelo levantamento do Alto de Três Lagoas e compartimentação nas Sub-bacias de Apucarana e Alto Garças. Para o autor, a maior espessura e a predominância de folhelhos na Sub-bacia de Apucarana evidenciam maior subsidência em ambiente relativamente mais profundo. Condições mais rasas foram interpretadas para a Sub-bacia de Alto Garças, tendo por base o fato de que a seção é mais arenosa.                                                                                           |
| RODRIGUES & QUADROS (1976). | Indicaram indiretamente a presença de dois depocentros na Bacia do Paraná à época devoniana. Os autores interpretam uma fonte continental para os sedimentos da Formação Ponta Grossa, com base na frequência de caulinita e na distribuição do elemento boro. A frequência de caulinita indica a influência continental na bacia. A mesma diminuiria da base para o topo e dos flancos norte e leste para o interior da bacia, indicando que as regiões fontes dos sedimentos, durante o Devoniano, seriam os flancos norte e leste da Bacia do Paraná. A análise do teor de boro identificou uma paleosalinidade baixa, com aumento progressivo deste teor para oeste e diminuição para a base da unidade. |
| FERREIRA et al. (1981)      | Segundo os autores o alinhamento estrutural de Guapiara mostra continuidade a oeste do Rio Paraná, representado pelo Alto de Três Lagoas e pelo Arco de Campo Grande. Este alinhamento, que atuou como um alto à época da deposição da Formação Ponta Grossa, separa os depocentros de Alto Garças (MT) e Apucarana (PR).Com base em dados aeromagnetométricos, os autores concluíram que a depressão de Apucarana foi controlada tectonicamente, sendo resultado do afundamento do bloco compreendido entre os alinhamentos de São Jerônimo-Curiúva e Rio Alonso.                                                                                                                                           |

Tabela 3–Influência tectônica sobre a sedimentação da Formação Ponta Grossa nas Sub-bacias de Apucarana e de Alto Garças, descritas na literatura (continuação)

|                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>ANDRADE &amp; CAMARÇO (1982)</p> | <p>Defenderam a existência de movimentações tectônicas durante a deposição dos sedimentos da Fm. Ponta Grossa. Para eles, após a deposição da Fm. Furnas seguiu-se um suave levantamento do flanco norte (GO) da bacia, do que resultou a formação de um conglomerado basal na Formação Ponta Grossa. Novo levantamento entre o Emsiano e o Givetiano teria sido responsável pela reativação das áreas-fonte a leste e formação de uma cunha progradacional deltaica na porção média da Formação Ponta Grossa.</p> <p>Distinguiram quatro unidades no sudoeste de Goiás , que chamaram respectivamente de "Formação Furnas" e "membros inferiores, médios e superiores" da "Formação Ponta Grossa".</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>FULFARO et al.(1982)</p>         | <p>A deposição da sequência devoniana da Bacia do Paraná foi controlada por uma calha deposicional NW-SE, transversal à direção das estruturas brasileiras de seu embasamento cristalino, herança de aulacógenos tardios de direção preferencial NW-SE, desenvolvidos ao final da cratonização da faixa de dobramentos da região sul e sudeste da Plataforma Sul-Americana. Interpretaram tais estruturas NW como zonas de fraqueza, reativadas no final do Siluriano e início do Devoniano com o levantamento do Arco de Assunção. Nova reativação destes alinhamentos, a partir do Devoniano Superior, teria causado erosão nos blocos altos e gerado a discordância que separa os grupos Paraná (Devoniano) e Itararé.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <p>MELO (1988)</p>                  | <p>Dividiu o Grupo Chapada localizado na Sub-bacia Alto Garças em quatro subunidades referidas na ordem de 1 a 4.A litologia da Unidade 1 é similar à da Formação Furnas da Sub-bacia Apucarana e consistem predominantemente em arenitos, grossos a finos. A Unidade 2 também é predominantemente arenítica e sua litologia compreende um conglomerado basal capeado por arenito roxo-avermelhado fino com intercalações de siltitos e folhelhos; o topo consiste em arenitos cinza-avermelhados, finos a médios. A Unidade 3 é restrita à borda nordeste da bacia é substituída lateralmente em direção ao centro da Sub-bacia pelos folhelhos e arenitos da parte superior da Unidade 2. Litologicamente é composta por arenitos avermelhados de granulação média a grosseira com níveis conglomeráticos, característicos de deposição deltaica em ambientes marinhos rasos fortemente influenciados por ondas (ANDRADE &amp; CAMARÇO, 1982). A unidade 4 do Grupo Chapada consiste em folhelhos cinza escuros com intercalações de arenitos argilosos e siltitos.</p> |

Tabela 3–Influência tectônica sobre a sedimentação da Formação Ponta Grossa nas Sub-bacias de Apucarana e de Alto Garças, descritas na literatura (conclusão)

|                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>PEREIRA E BERGAMASCH (1996)</p> | <p>Os autores interpretaram a existência de um controle estrutural do registro sedimentar desde o Ordoviciano (sedimentos pré-Furnas). Deste modo, a Formação Furnas teria se depositado em um contexto tectônico estável, devido à relativa homogeneidade do seu pacote sedimentar e pela distribuição dos sistemas deposicionais. A paleogeografia da Bacia do Paraná para esta época teria uma paleopendente principal direcionada para WSW. Durante o Pragiano se iniciaria uma nova compartimentação, originando assim, dois depocentros na bacia. Os mesmos estariam individualizados por uma restrição em torno da latitude 20°Sul, na altura do Alto de Três Lagoas. Esta compartimentação prosseguiria por todo o Devoniano da bacia, culminando no Devoniano Médio. A comunicação entre as Sub-bacias voltaria somente no Frasniano.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <p>PEREIRA et al. (1998)</p>       | <p>Segundo estes autores, para a Sub-bacia de Alto Garças, a sequência devoniana pode ser subdividida em duas sequências, propostas anteriormente por Pereira (1992) com base em análise estratigráfica do Paleozoico médio desta sub-bacia. A sua Sequência I (eodevoniana) engloba a Formação Furnas e o membro inferior da Formação Ponta Grossa, este último depositado em um contexto de mar alto, recobrando os depósitos continentais a transicionais do topo da formação subjacente. A Sequência II (neoemsiânica a frasniana) compreende os membros médio e superior da Formação Ponta Grossa. Neste caso, o membro médio corresponderia ao conjunto sedimentar progradante, num contexto de plataforma marinha rasa dominada por ondas e progressivamente afogada em episódios de aumento relativos do nível do mar. A seguir, o membro superior teria se depositado em condições marinhas de <i>offshore</i>. O limite entre as sequências I e II é uma discordância tipo II, caracterizada nas bordas da Sub-bacia de Alto Garças, entre os membros inferior e médio da Formação Ponta Grossa, passando a uma concordância relativa no interior da sub-bacia.</p> |

Fonte: A autora, 2017

A origem do limite na sequência devoniana entre as formações Furnas e Ponta Grossa é motivo de inúmeras discussões. Petri (1948) atribuiu uma natureza concordante para este contato e evidenciou a existência de um conjunto de estratos que seriam responsáveis por conferir uma passagem transicional entre as unidades (“Camadas de Transição”). Lange (1967) e Lange & Petri (1967) consideram este contato como concordante e gradacional devido à suposta origem marinha para os arenitos brancos da Formação Furnas. Outros autores não concordam com tal suposição como é o caso de Ludwing & Ramos (1965), e Zalán et al. (1987). Rocek & Rage (1994), consideraram o contexto marinho para a Formação Ponta Grossa, ao revisarem a ocorrência de uma provável pegada de anfíbio *Ichthyostegalia*,

anteriormente estudado por Leonardi (1982; 1983), assumiram tratar-se de um exemplar incompleto de *Asteriacites*.

Bergamaschi (1999) colocou-se de acordo com Petri (1948) quanto à natureza deste contato, quando este é analisado em uma escala de segunda ordem. Contudo, este autor sugere que o contato seja considerado de natureza brusca.

Estudos realizados na Formação Ponta Grossa consideram o seu conteúdo icnofossilífero pobre, embora esta formação seja considerada rica em fósseis. No trabalho pioneiro de Clarke (1913) foram descritas bioerosões através de registros de tubos ou canais nas conchas de moluscos bivalves e Lange & Petri, (1967) relataram as primeiras ocorrências de icnogêneros na Formação Ponta Grossa.

A ocorrência de *Zoophycos isp*, presente na Formação Ponta Grossa, é empregada como indicador batimétrico refletindo fácies mais profundas da sedimentação devoniana na Bacia do Paraná, correspondente a região de *offshore* externo (CAMPANHA, 1985). Fernandes & Melo (1985) identificaram a icnoespécie *Bifungites paranaensis* nos depósitos da Formação Ponta Grossa. Posteriormente, Castro (1988) identificou *Zoophycos isp* nas camadas em questão.

Aguiar (2004) identificou no poço PALEOSUL 02-RV-MS (Formação Ponta Grossa), localizado na Sub-bacia de Alto Garças, as icnofácies *Skolithos*, *Cruziana* e *Zoophycos isp*, relacionadas a um ambiente marinho, com variação na batimetria.

Na Formação Ponta Grossa foram identificadas as Icnofácies *Zoophycos isp*, *Cruziana arquetípica*, *Cruziana proximal*, *Cruziana empobrecida* e *Glossifungites* (ABELHA et al., 2007). Na Icnofácies *Zoophycos isp*, os autores identificaram os icnogêneros *Helminthopsis* e *Zoophycos isp*. A Icnofácies *Cruziana arquetípica* é localmente composta por *Asterosoma*, *Palaeophycus*, *Planolites*, *Rhizocorallium* e *Teichichnus*, representando um contexto paleo deposicional de mar raso de costa afora, abaixo do nível de ação de ondas de tempo bom, porém dentro do nível de base de ação de ondas de tempestade. A Icnofácies *Cruziana proximal*, segundo os autores, é assinalada pela presença de *Skolithos*, *Lockeia* e *Arenicolites*, sugerindo um aumento da energia do meio e caracterizando um paleoambiente mais proximal. A Icnofácies *Cruziana empobrecida* é composta por *Schaubcylindrichnus*, *Asterosoma*, *Planolites*, *Teichichnus*, *Zoophycos isp* e estruturas de escape, que caracterizam paleoambiente de mar raso de costa afora sujeito a ações de tempestade com influência deltaica. Finalmente, os autores reconheceram a Icnofácies *Glossifungites*, na qual ocorre *Thalassinoides*, identificando, baseado nela, um provável evento de regressão forçada dentro do contexto transgressivo geral dessa sequência deposicional (SEDORKO et al.; 2013).



Existe a teoria de que o declínio da produção primária, causada pela transgressão Eifeliana/Givetiana, propiciou espaços ecológicos vazios imediatamente ocupados por imigrantes que, mesmo sob condições adversas, teriam suas necessidades alimentares ainda atendidas. Essa teoria foi confirmada por Bosetti et al. (2011) ao identificarem grandes quantidades do icnogênero *Phycosiphon*.

Segundo Netto et al. (2012) o Devoniano paranaense (Givetiano) é marcado por seis suítes principais: *Asterosoma*, *Chondrites*, *Cylindrichnus*, *Diplocraterion*, *Gordia*, *Halopoa*, *Helminthopsis*, *Hemidallia*, *?Lennea*, *Lingulichnus*, *Lockeia*, *Macaronichnus Palaeophycus*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Skolithos*, *Taenidium satanassi* e *Zoophycos isp*, que representam a Icnofácies *Cruziana*.

Estudos de escopo sobre *shale gas* na Bacia do Paraná são considerados muito recentes quando comparados aos realizados sobre as rochas argilosas da bacia de maneira geral.

Alguns trabalhos relevantes direcionados a exploração não convencional (*shale gas*) foram realizados por Carelli (2010), Juschaks Filho (2013) e Maia (2015).

Carelli (2010) discutiu processos sedimentares e paleoambientais além de analisar o potencial reservatório ou selante dos folhelhos da Formação Ponta Grossa. Juschaks Filho (2013) aplicou técnicas de análise de perfis com o objetivo de se avaliar características de reservatórios do tipo *shale gas* em três poços localizados na Bacia do Paraná, para a identificação de zonas ricas em matéria orgânica e obtenção do teor de carbono orgânico total equivalente (COTeq). Maia (2015) analisou dados de poços da Bacia do Paraná, com foco na Formação Irati, selecionados de acordo com os parâmetros requeridos para acumulações econômicas de *shale gas* e executou a modelagem 1D e 2D nesses poços, no intuito de avaliar seu potencial e determinar às possíveis áreas plausíveis a produção economicamente viável.

## 2.2 Membro Jaguariaíva

Proposto por Lange & Petri (1967) para designar a parte basal da Formação Ponta Grossa no Estado do Paraná, o Membro Jaguariaíva é um pacote homogêneo de folhelhos sílticos de coloração cinza média a escura, com muitos fósseis, e frequentemente bioturbados. De idade praguiana-emsiana (LANGE 1967, LOBOZIAK et al., 1995; GRAHN et al., 2000), sua espessura varia entre 50 e 100 m nas faixas de afloramento, valores que se repetem na

maioria dos poços. A seção tipo do Membro Jaguariaíva em superfície está localizada no ramal ferroviário Jaguariaíva-Arapoti (antigo ramal Jaguariaíva-Jacarezinho), na zona urbana do Município de Jaguariaíva (BOLZON et al., 2002).

De acordo com Lange & Petri (1967), a origem marinha do membro Jaguariaíva é demonstrada pelo seu conteúdo fóssil. Ainda de acordo com esses autores, a unidade foi depositada em zona marinha nerítica de plataforma. Segundo Bolzon et al.(2002), o intervalo aflorante do Membro Jaguariaíva no ramal ferroviário Jaguariaíva-Arapoti é praticamente todo fossilífero, possuindo importância paleontológica pela ocorrência de grande diversidade de fósseis de invertebrados devonianos característicos da fauna Malvinocáfrica, como Cnidária (Conulariida), Brachiopoda, Mollusca (Bivalvia, Gastropoda e Tentaculitoidea), Trilobita e Echinodermata (Crinoidea), além de microfósseis, vegetais e abundantes traços fósseis. Em relação a estes grupos de invertebrados, Petri (1948 apud BOLZON et al., 2002) evidenciou a predominância dos braquiópodes em relação aos demais e a relativa abundância dos trilobitas e dos moluscos bivalves. O afloramento apresenta característica argilosa que predomina em subsuperfície.

O Membro Jaguariaíva apresenta um contato concordante gradacional sobre a Formação Furnas, sendo recoberto em discordância pelos arenitos do Grupo Itararé (PETRI, 1948; POPP & BARCELLOS-POPP, 1986; CIGUEL, 1989 APUD AZEVEDO et al., 2002). A presença de pirita é comum no membro, especialmente em folhelhos mais escuros. Nódulos calcários escuros com fósseis bem preservados, bem como concreções sideríticas avermelhadas a púrpura ocorrem em toda a seção (LANGE & PETRI, 1967).

A seção colunar Jaguariaíva foi indicada por Bergamaschi (1992) como sendo aquela que apresenta uma das melhores exposições do contato Furnas/Ponta Grossa em toda a bacia. Introduzindo uma visão genética à análise, o limite entre as unidades foi colocado na base da Formação Ponta Grossa, arenito fino que aparece truncando os sedimentos grossos do topo da Formação Furnas. Assim, as fácies presentes no intervalo estratigráfico denominado “camadas de transição” (*sensu* PETRI, 1948) corresponderiam ao registro da implantação de um sistema de *shoreface* inferior (base do Ponta Grossa) sobre depósitos transicionais a costeiros do topo da Formação Furnas.

Zalán et al. (1987) defenderam a existência de um contato discordante entre as duas unidades litoestratigráficas e assinalaram que um hiato de 10 Ma deveria ter ocorrido entre a deposição destas unidades. O contato discordante estaria confirmado através de observações de campo e análises de perfis elétricos.

Em contraposição, o hiato de 10 Ma é contestado por um conjunto de dados que reúne datações das camadas superiores da Formação Furnas (DINO & RODRIGUES, 1995; GERRIENNE et al., 2001) e dos níveis basais da Formação Ponta Grossa (LOBOZIAK et al., 1995; DINO et al., 1995; GRAHN et al., 2000; GRAHN et al., 2010).

A base da Formação Ponta Grossa foi definida de idade praguiana (GRAHN, 1999) devido à ocorrência da espécie de quitinozoário *Ramochitina magnífica* Lange. A mesma foi observada a 15 metros acima do limite Furnas/Ponta Grossa na seção Jaguariaíva (GRAHN, 1997). Todavia, a idade praguiana para a primeira ocorrência da espécie de quitinozoário *Ramochitina magnífica* Lange não é consensual. A zona de *Ramochitina magnífica* foi definida como lochkoviana em estudos realizados e camadas fossilíferas da Formação Tegueje, Bolívia (STREEL et al., 1987; STEEMANS, 1989).

O limite entre as Formações Furnas e Ponta Grossa observados no campo, engloba uma interação de diversos sistemas deposicionais que mantêm uma estreita relação genética, ou seja, uma sucessão de depósitos deltaicos, costeiros e marinhos rasos, dispostos dentro de um arranjo retrogradacional relacionado a uma elevação relativa do nível do mar. Com isso, existiria um hiato entre estas unidades, que deveria ser pequeno e estar acompanhado de uma pequena erosão submarina (truncamento do *shoreface* inferior com o *shoreface* superior). Segundo Bergamaschi (1992) e Pereira (1992), não há qualquer indício de erosão subaérea ou deslocamento das fácies em direção à bacia.

Análises faciológicas do intervalo que contém este limite, nas proximidades das cidades de Ponta Grossa e Tibagi possibilitaram a identificação de ambientes transicionais compostos por sedimentos deltaicos e de ilhas de barreiras, assim como sedimentos relacionados ao ambiente marinho raso (RODRIGUES et al., 1988). Estes sistemas foram gerados em um processo transgressivo durante o Devoniano inferior, o que provocou o afogamento de áreas continentais que estavam submetidas a sistemas fluviais de alta energia (RODRIGUES et al., 1988). Tal estudo mostra a interação existente entre os diversos sistemas deposicionais no intervalo que engloba o limite entre as Formações Furnas e Ponta Grossa.

Os afloramentos nos Estados de Paraná e Goiás indicam que, no contato entre estas duas unidades, há evidências de um acréscimo abrupto na lâmina d'água. Com isso o limite estaria associado, provavelmente, a um limite de conjunto de parassequências. Como não se observa um truncamento associado à erosão subaérea e um significativo hiato, não é admissível supor que a superfície que limita as Formações Furnas e Ponta Grossa represente um limite de sequência (PEREIRA & BERGAMASCHI, 1996).

Segundo Pereira et al. (2010) a seção devoniana inferior da Bacia do Paraná é constituída por um espesso pacote predominantemente argiloso depositado em condições de costa - afora. A mesma é formada por um pacote composto por interlaminacões de folhelhos, siltitos e arenitos muito finos. Nessa seção, são ainda observados folhelhos negros com teores relativamente altos de Carbono Orgânico Total (COT). Os resultados alcançados pelos referidos autores mostram que os intervalos com elevados teores de COT apresentam valores isotópicos ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ ) mais negativos, alta concentração de elementos ligados à matéria orgânica e rara bioturbação. Os mesmos estão associados aos momentos de máxima inundaçã, quando foram implantadas na bacia condições anóxica/disóxica, que permitiram a preservaçã da matéria orgânica.

### 3 TRABALHOS ANTERIORES REALIZADOS NOS POÇOS PALEOSUL 03-JA-PR E PALEOSUL 02-RV-MS

#### 3.1 Poço PALEOSUL 03-JA-PR

A sondagem do poço PALEOSUL 03-JA-PR foi realizada na faixa de afloramentos da Formação Ponta Grossa, na borda leste da Bacia do Paraná (Sub-bacia de Apucarana) (Figura 2), no município de Jaguariaíva.

Rezende (2007) identificou no registro sedimentar do poço PALEOSUL 03-JA-PR as sequências deposicionais de terceira ordem “B” e “C (*sensu* BERGAMASCHI, 1999; BERGAMASCHI & PEREIRA, 2001), por meio da interpretação de superfícies de inundação máxima e discordâncias por padrões distintos nos perfis dos diferentes métodos utilizados associados às fácies e estruturas sedimentares (Figura 8). A separação entre as duas foi feita por uma feição de ravinamento na base de um nível arenoso, mais espesso. Esta feição erosiva ocorre na profundidade de 50 metros e representa um limite de sequência de terceira ordem. Segundo Bergamaschi (1999) as sequências deposicionais de terceira ordem em bacias intracontinentais apresentam algumas dezenas de metros de espessura.

A Superfície de Inundação Máxima (SIM) desta sequência é assinalada na profundidade de 56 metros, na mais expressiva anomalia de COT do poço 03-JA-PR. Em adição, nesta profundidade verificaram-se também anomalias com baixa razão Th/U, alta argilosidade e baixo  ndice de bioturbação registrados no poço, indicativos de restrição   sedimentação e um ambiente relativamente menos favorável a oxidação da m teria orgânica. Ainda assim, os teores de COT na sequência são considerados baixos associados a uma razão Th/U relativamente mais elevada. Fato que pode estar associado a um ambiente favorável a oxidação da m teria orgânica, com menor produtividade primária e influência do aporte sedimentar na diluição da m teria orgânica nos sedimentos neste intervalo, mesmo em condições transgressivas.

A partir da superfície de máxima inundação os sistemas deposicionais retornam as condições normais anteriores, com registros de acentuadas quedas nos teores de COT e de argilosidade, além de aumento na razão Th/U, mesmo em fácies argilosas, até o registro do limite de sequência, posicionado em 50 metros.

Segundo o autor a sequência deposicional “B2” tem seu limite inferior registrado na profundidade de 128 metros, associado à base de uma camada de arenito fino a partir do qual é iniciada uma tendência transgressiva bem marcada nos perfis de COT e de Th. Foi notado um nítido o aumento na concentração de COT até um máximo de inundação, neste poço na profundidade de 117 metros, após o qual, há uma inflexão nos perfis, com retorno a uma tendência regressiva que caracteriza o trato de sistema de mar alto.

No perfil de Th observou-se que mesmo em um contexto transgressivo o aporte sedimentar ainda exercia alguma influência sobre o controle da sedimentação, pela existência de uma anomalia positiva dentro de um padrão de baixas concentrações de Th. Do mesmo modo, o perfil de U respondeu com uma rápida queda nos valores de U, em comparação aos registrados na base da sequência.

O trato de sistemas transgressivo também pode ser observado pelo empilhamento de fácies que apresentam mudanças principalmente relacionadas à redução efetiva de bioturbação. Somou-se a grande quantidade de bioclastos preservados e a formação de *pellet* de glauconita em lente de arenito, na profundidade de 123,3 metros. A glauconita é considerada na literatura (MORAD et al., 2000; KETZER et al., 2003) como um mineral eodiagenético, característico de ambientes com baixa oxigenação e reduzida sedimentação.

Da SIM em diante foram estabelecidas condições regressivas, com aumento da concentração de Th e de fácies arenosas e/ou bioturbadas, redução dos teores de COT e estabilização da concentração de U. A razão Th/U mostrou de forma nítida a passagem do afogamento para condições com maior influência do aporte sedimentar até o limite superior da sequência registrado por um *lag* transgressivo na profundidade de 99 metros.

O registro da sequência “B3” exibiu o trato de sistemas transgressivo e o trato de sistemas de mar alto. O trato de sistemas transgressivo foi marcado segundo Rezende (2007) por uma tendência de aumento de argilosidade e de concentração de U, o que permitiu marcar um máximo de afogamento, registrado nos perfis em 90 metros. Entretanto, os teores de COT permaneceram baixos e constantes sem anomalias significativas no perfil. A razão Th/U da sequência sugeriu uma coluna d’água óxica, com importante influência do aporte sedimentar no registro deste intervalo.

A partir da máxima inundação há uma contínua redução na argilosidade e estabilização da razão Th/U, que caracterizam o trato de sistemas de mar alto. Estes padrões são mantidos até um evento anômalo que marca uma extrema restrição dos sistemas deposicionais locais, com efetiva baixa de oxigenação.

Rezende (2007) observou que não ocorre aumento nos teores de COT que nessas condições podem indicar um evento que também atua na diminuição na produção primária de matéria orgânica. Após este evento, retornam valores elevados na razão Th/U e ocorre uma quebra bem marcada no perfil de COT, na qual foi interpretado o final do registro da sequência deposicional “B3” na profundidade de 70,5 metros.

A sequência deposicional “B4” apresenta um trato de sistemas transgressivo com uma ciclicidade, bem definida, em ciclos transgressivos - regressivos de alta frequência, caracterizados por variações na oxigenação da coluna d'água. O máximo afogamento desta sequência foi atingido na profundidade de 56 metros e associou-se ao evento de afogamento de terceira ordem da sequência “B”. Ocorreu em uma expressiva anomalia em U, que pode indicar um ambiente com menores oxigenação e sedimentação (Rezende, 2007).

O autor sugeriu que neste afogamento os sistemas atingiram condições ideais de preservação de matéria orgânica entre a produção primária, oxigenação e aporte sedimentar. Estas condições não foram verificadas nos afogamentos anteriores da sequência “B4”, por ocorrerem ainda anomalias de Th e K que indicam alguma influência de aporte sedimentar no início da transgressão. Instala-se, a partir de 56 metros, uma tendência regressiva que coincide com o registro do trato de sistemas de mar alto da sequência “B4”.

Com o registro do o limite de sequência em 50 metros é iniciada a deposição da sequência deposicional de terceira ordem “C”. Neste poço, foi interpretada apenas sua porção inferior, correspondente à sequência deposicional de quarta ordem “C1”.

As condições ambientais que controlaram a deposição desta sequência são semelhantes àquelas vigentes durante a deposição da sequência deposicional “B3”, no que trata da ciclicidade, da evolução na preservação da matéria orgânica e das condições de oxigenação da coluna d'água.

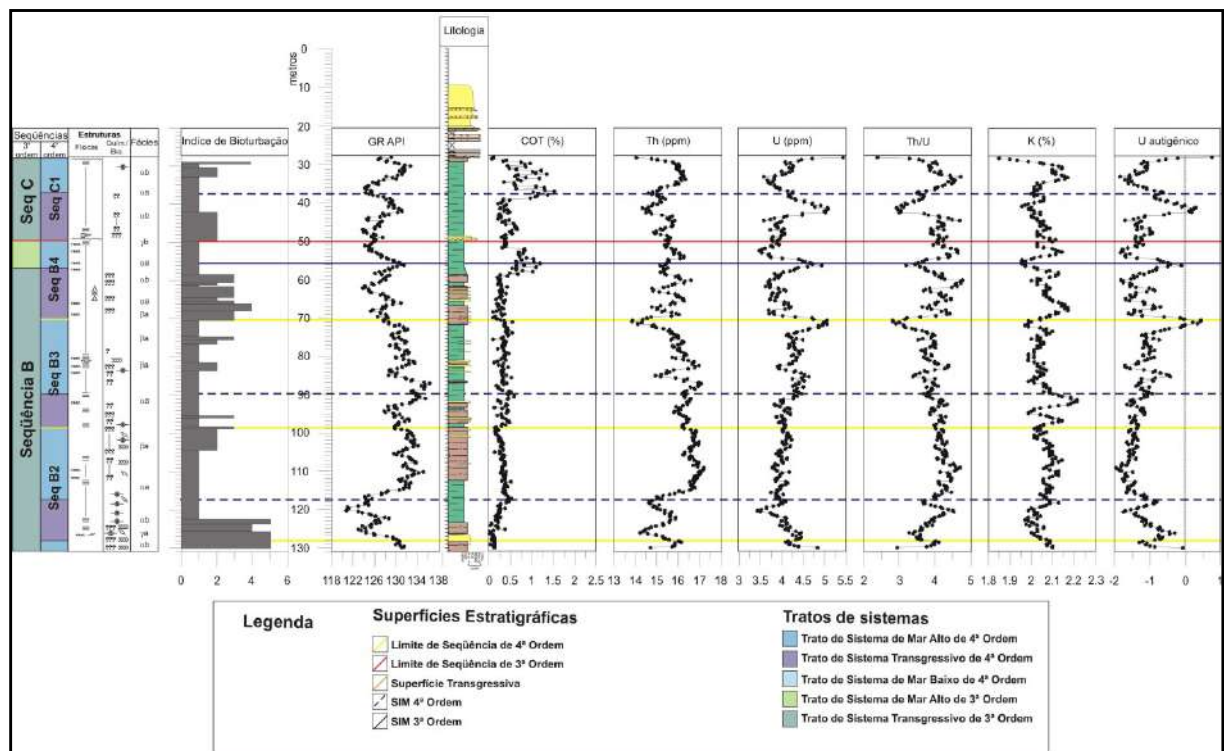
O trato de sistemas transgressivo é iniciado com a deposição de interlaminados entre arenitos finos a médios intercalados com níveis de folhelho siltico são depositados sobre esta feição. É caracterizado em perfis por forte tendência de redução na razão Th/U e aumento da argilosidade e dos teores de COT até o máximo afogamento da sequência. Este afogamento foi marcado na maior anomalia de COT atingida nesta sequência, registrada na profundidade de 38 metros.

Foram observadas nos níveis arenosos perfurações verticais associadas à atividade de vida de organismos bentônicos, representativas de um ambiente de mais alta energia. A presença de muscovitas expandidas em um arcabouço petrográfico fechado por intensa compactação, sugere, de acordo com Freitas-Brazil (2004), um momento de queda relativa do

nível do mar, com percolação de águas meteóricas, anterior à efetiva transgressão. Observou-se a falta de sincronismo entre a maior anomalia de U e a maior anomalia de COT. Este fato foi interpretado como uma resposta mais rápida das condições ambientais ao afogamento em relação à produção primária de matéria orgânica no ambiente sedimentar. O autor sugeriu para este caso, com o ambiente deposicional sob condições relativamente mais redutoras que o U disponível pode ter sido rapidamente precipitado, enquanto o máximo de produtividade de matéria orgânica, que favoreceu a concentração foi atingido algum tempo depois.

Foram retomadas tendências regressivas como aumento da razão Th/U, aumento do registro de bioturbação e diminuição dos teores de COT em direção ao topo da sequência. Estes elementos associados permitiram caracterizar um trato de sistema de mar alto para a sequência deposicional “C1” Para a sequência deposicional “C” supõe-se a continuidade do trato de sistemas transgressivo de terceira ordem.

Figura 8 – Perfil composto e divisão estratigráfica do registro sedimentar no poço PALEOSUL 03-JA-PR.



Fonte: Rezende, 2007.

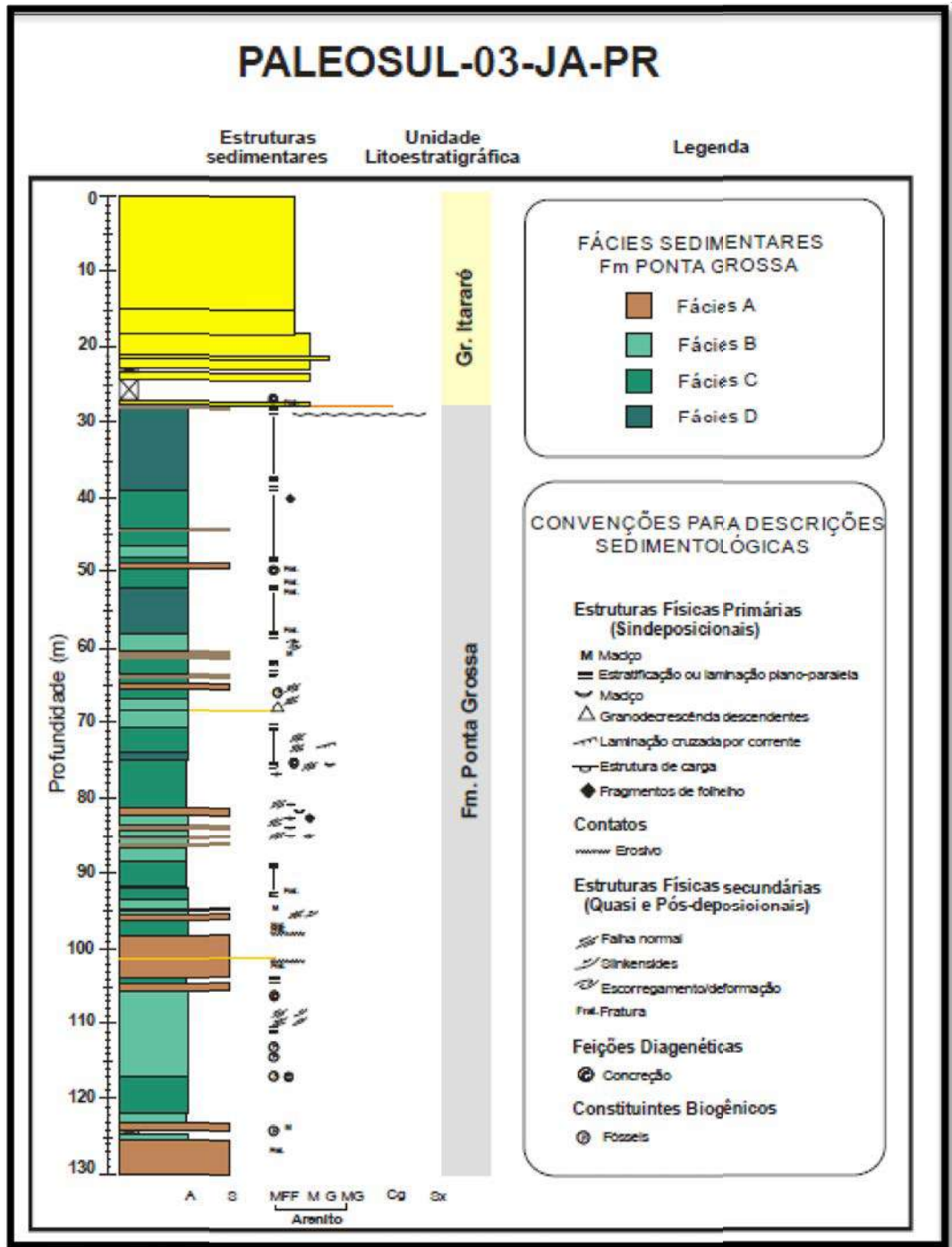
Gama (2009) realizou uma análise faciológica do poço PALEOSUL03-JA-PR onde definiu quatro fácies sedimentares baseando-se principalmente em parâmetros litológicos e texturais, e nas estruturas sedimentares (Figura 9). Foram descritas três fácies com predomínio de folhelho (B, C e D) e uma fácies com predomínio de siltito (A). No poço



estudado foram observadas duas boas correlações principais envolvendo as fácies sedimentares, a intensidade de bioturbação e elevados valores de Carbono Orgânico Total, nas profundidades entre 58 e 51 metros e 38 e 28 metros. Nestes dois horizontes pôde ser observada claramente uma correlação entre os três parâmetros acima listados. A autora observou que onde a bioturbação é ausente, os sedimentos são representados por fácies de folhelhos escuros finamente laminado, e por elevados teores de COT. Corroborando com estudos anteriores (Figura 8).

Os dados do COT também foram comparados por Gama (2009) com os dados de raios-gama para identificação de horizontes mais anóxicos de acordo com os teores de Urânio e para divisão em unidades quimioestratigráficas. No entanto, foi observado que a curva do Urânio não acompanhava as tendências da curva do COT. Pelo contrário, existe uma razão inversa entre as duas curvas. Quando os valores do COT são altos, os valores de Urânio diminuem. Segundo a autora houve contínuo aporte de terrígenos, ou seja, não houve condições para deposição de folhelhos radioativos ricos em Urânio (comparando com o COT). Desta forma, explica-se o fato do Urânio não acompanhar a curva do COT, e haver uma correlação direta entre o Tório e o Urânio. Observando-se os valores de COT, nota-se que os mesmos não são altos. A maior anomalia foi encontrada na profundidade de 37 metros com 1,52 %C. A média de COT para este poço é de 0,392 %C. Pode-se observar assim, que a deposição ocorreu em um ambiente sem as condições ideais para a preservação da matéria orgânica.

Figura 9 - Perfil sedimentológico do poço PALEOSUL 03-JA-PR.



Legenda: Perfil sedimentológico, mostrando o empilhamento das fácies do poço PALEOSUL 03-JA-PR.  
Fonte: Gama, 2009.

### 3.2 Poço PALEOSUL 02-RV-MS

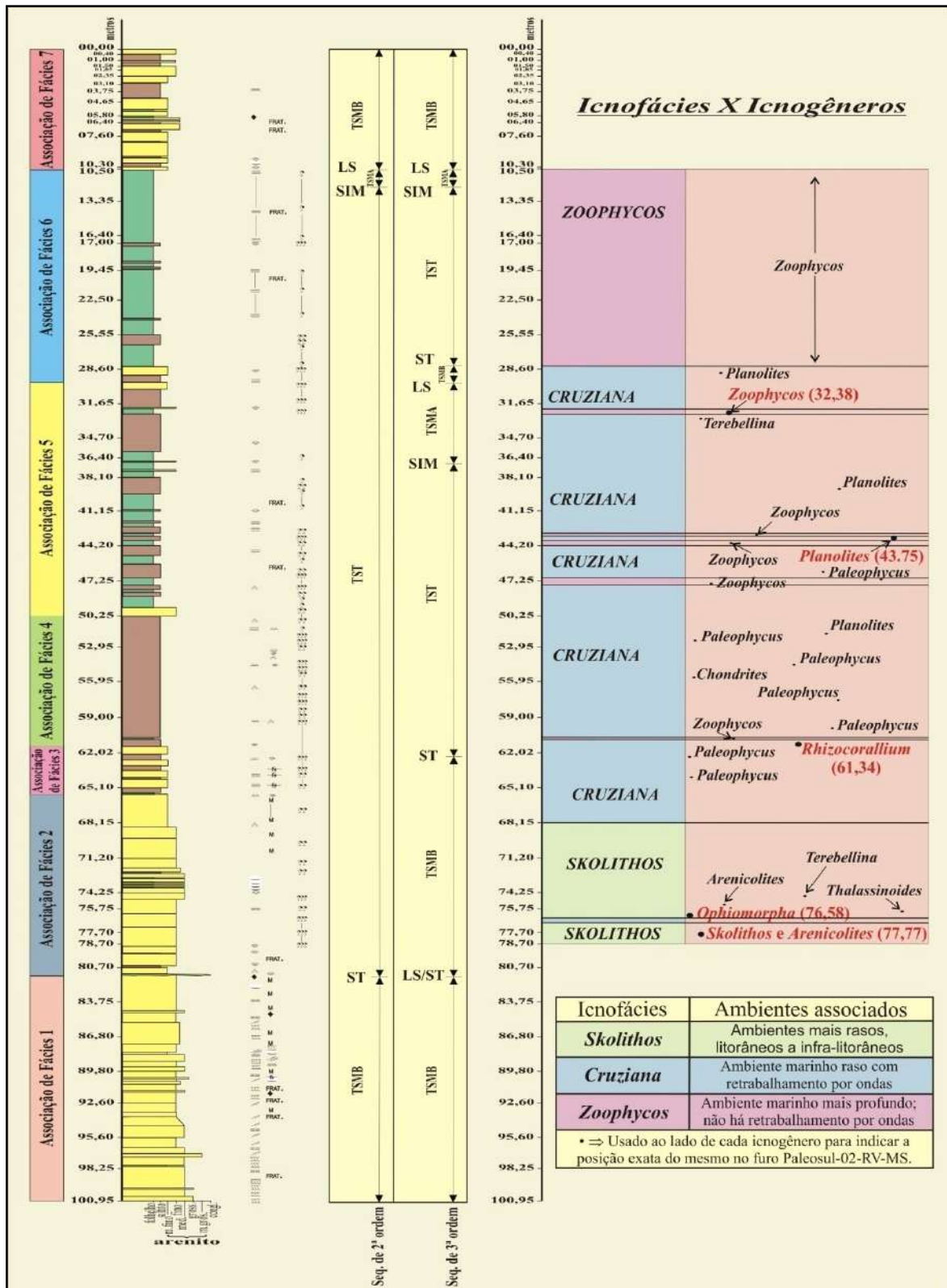
Na região de Rio Verde no Mato Grosso do Sul, sub-bacia de Alto Garças (RAMOS, 1970) Pereira (2000) realizou a descrição estratigráfica e análise de COT de um afloramento de cerca de 37 m próximo ao qual posteriormente, em 2003 foi perfurado o poço PALEOSUL02-RV-MS (Figura 2).

A seção descrita está atribuída ao intervalo Praguiano devido à datação estabelecida por Grahn (1998) com base em quitinozoários, para o afloramento estudado por Pereira (2000) e corroborado por Pereira et.al. (2010) confirmando através de estudos quimioestratigráficos o evento transgressivo Praguiano, que marca a primeira inundação em escala de bacia que atingiu a Bacia do Paraná. (PEREIRA et.al.; 2010). Contudo, Mendlowicz Mauller et.al.(2009) reposicionaram as amostras do topo da Formação Ponta Grossa no PALEOSUL 02-RV-MS no intervalo Emsiano.

A seção testemunhada do poço PALEOSUL 02-RV-MS foi detalhada através de análise estratigráfica e estudo de icnofácies por Aguiar (2004). O perfil corresponde a arenitos do topo da Formação Furnas, na base, seguidos pela Formação Ponta Grossa até sua primeira superfície de inundação máxima, a qual se apresenta truncada pelos arenitos da Sequência “C” de Bergamaschi (1999), no topo da seção. Segundo a autora, a porção referente às formações Furnas e Ponta Grossa, isto é, da base a 10,30 m do PALEOSUL 02-RV-MS, pode ser englobada em uma única sequência de 2ª ordem.

Aguiar (2004) estabeleceu 7 associações de fácies e sequências de 2ª e 3ª ordem no PALEOSUL 02-RV-MS, identificando as sequências “A”, “B” e “C” (sequências de 3ª ordem sensu Bergamaschi, 1999) para a Bacia do Paraná na seção (Figura 10). A autora descreve a passagem, em direção ao topo da seção, de depósitos transicionais a costeiros, em sua associação de fácies 1, para sedimentos *offshore*, da associação de fácies 6. Esta mudança é vista no progressivo aumento da presença de folhelhos associados à diminuição da intensidade das bioturbações e a diminuição da ação de ondas, na tendência crescente dos valores de COT, e, principal contribuição da referida autora, na transição das icnofácies *Skolithos* para *Cruziana* e *Zoophicus* no topo (Figura10).

Figura 10 – Resultados de Aguiar (2004) para o poço PALEOSUL 02-RV-MS.



Legenda: Podem ser observadas as 7 associações de fácies, o perfil litológico, estruturas sedimentares, as seqüências de 2ª ordem (Bergamaschi, 1999) e de 3ª ordem, e as icnofácies e icnogêneros.

Fonte: Aguiar, 2004.

Segundo Dias (2006) os teores de carbono orgânico da Formação Ponta Grossa no PALEOSUL 02-RV-MS são, em geral, inferiores a 1,0 %, com valores um pouco mais elevados na parte superior da seção (topo da Sequência B de BERGAMASCHI, 1999).

A curva de distribuição dos referidos teores, desde a base até cerca de 36,00 m, oscila em torno de uma média de 0,5%, sem tendências acentuadas de aumentos ou decréscimos. A seguir, os valores tendem a decrescer até a amostra 29,88 m. A partir daí, observa-se um aumento progressivo dos valores de carbono orgânico, elevando-se novamente até 24,55 m, e voltando a decrescer (até 15,08 m) e a aumentar, atingindo teor de 1,89% de carbono orgânico na amostra 12,23 m. Este enriquecimento em direção ao topo corresponde a uma tendência geral transgressiva corroborando os resultados da análise icnofaciológica de Aguiar (2004).

As variações descritas podem estar correlacionadas a afogamentos sucessivos e progressivos, podendo ser interpretado inicialmente um arranjo em parassequência aparentemente agradacional, até aproximadamente os 36,00 m. De 29,88 ao topo da seção, segue um arranjo em parassequências nitidamente retrogradacionais, onde se observa um aumento progressivo dos valores de carbono orgânico, culminado em uma superfície de inundação máxima em torno da amostra 12,23 m.

Esta superfície de inundação máxima identificada é a superfícies de 3ª ordem de Aguiar (2004). Rodrigues & Bergamaschi (1997) referem-se a esta primeira inundação da formação Ponta Grossa como de idade Praguiana-Emsiana para a Sub-bacia de Apucarana.

A diminuição da intensidade das bioturbações corresponde ao aumento dos teores de carbono orgânico, cujos maiores valores ocorrem nos intervalos mais laminados, isto é, onde não se observam bioturbações.

Apesar da tendência transgressiva relatada, como visto, a maior parte dos valores do carbono orgânico no perfil estudado varia entre 0,4 e 0,8 %. A porção com teores acima de 1,0 % não possui grande espessura (inferior a 10 m). Assim, ao considerar-se a média histórica de valores de COT em rochas com bom potencial gerador de hidrocarbonetos como sendo, geralmente, superior a 1,5% (RODRIGUES, 1995), o intervalo com essas características seria pouco espesso. Entretanto, o carbono orgânico total indiretamente mede a quantidade, mas não a qualidade da matéria orgânica (PETERS et al., 2005). Assim, esta característica não deve ser analisada isoladamente, podendo ser compensada pelo grau de preservação, pelo tipo e pela evolução térmica da matéria orgânica contida na rocha.

Os poços supracitados foram estudados em trabalhos que abordaram análises estratigráficas de alta resolução com base em dados geoquímicos, sedimentológicos e icnológicos (AGUIAR 2004, DIAS, 2006, REZENDE, 2007, GAMA, 2009 e PEREIRA, et

al.,2010). Neste sentido, eles foram utilizados como um instrumento de suporte para a definição dos intervalos de interesse para a aplicação dos métodos desse trabalho.

### 3.3 Estudos faciográficos

Diversos autores estabeleceram fácies ou associações de fácies sedimentares em estudos realizados na Formação Ponta Grossa. Dentre os mais significativos, destacam-se os trabalhos de Pereira (1992), Schubert (1995), Assine (1996), Bergamaschi (1999) e Carelli (2010). Nos poços PALEOSUL 03-JA-PR e 02-RV-MS, estudos pormenorizados de caracterização de fácies e/ou associação de fácies foram realizados a partir de métodos de análises: paleoicnológicas, sedimentológicas, geoquímica estratigráfica (biomarcadores, COT, Isótopos estáveis de Carbono e Pirólise) e análise visual de querogênio (AGUIAR, 2004; DIAS 2006; REZENDE, 2007 e GAMA, 2009).

Carelli (2010) definiu que o termo microfácies refere-se a uma massa de sedimento ou rocha sedimentar caracterizada e distinguida das demais por atributos como mineralogia, microtextura, microtrama, microestruturas físicas e/ou biogênicas, microfósseis e conteúdo orgânico particulado observado através de técnicas de microscopia, somados a atributos como cor, fissilidade e variação estratal observados em escala megascópica.

A análise de microfácies mostra-se eficiente para a caracterização de processos e paleoambientes. Em uma sucessão de microfácies, o mapeamento das microestruturas, bem como a mudança na microtrama reflete mudanças nas condições ambientais e de sedimentação, além de fornecer pistas para a caracterização de uma condição deposicional específica (CARELLI, 2010; CARELLI & BORGHI, 2011). Esses autores analisaram rochas microclásticas coletadas por meio de plugagem, na borda Leste da Bacia do Paraná, nos afloramentos expostos nos cortes do ramal ferroviário Jaguariaíva-Arapoti, correspondendo à parte inferior (Trato Transgressivo) da sequência B de Bergamaschi (1999) e Bergamaschi & Pereira (2001).

Carelli (2010) identificou 9 microfácies, 2 típicas do Trato de Sistemas Transgressivo (TST) e 7 típicas do Trato de Sistema de Mar Alto (TSMA) (M3 a M9). As microfácies do TST mostram em geral microtrama caótica (em parte pela reestruturação biogênica), e composição rica em silte e areia muito fina (exceto pela microfácies rica em argila e microtrama orientada associada a uma superfície de inundação de 3ª ordem); as típicas do

TSMA, são ricas em silte e argila, apresentam uma microtrama relativamente orientada e melhor preservação de microestruturas físicas. A ação de ondas seguida da reestruturação biogênica em paleoambientes proximais é responsável pela melhor característica sedimentológica em termos de reservatório, quando comparada a outras microfácies. Fluxos hiperpicnais distais associados a processos decantativos, atividade microbiana e baixo índice de atividade biogênica em paleoambientes de prodelta/costa-afora são responsáveis pelas características selantes das microfácies associadas ao TSMA.

No poço PALEOSUL 03-JA-PR, estudado por Rezende (2007) e Gama (2009), foram observadas duas correlações principais envolvendo as fácies sedimentares, a intensidade de bioturbação e elevados valores de Carbono Orgânico Total, nas profundidades entre 58 e 51 metros e 38 e 28 metros. Segundo Dias (2006), a análise dos biomarcadores do poço PALEOSUL 02-RV-MS conferiu maior consistência à caracterização da matéria orgânica compreendida em suas amostras. Além disso, constitui uma assinatura geoquímica típica do intervalo Devoniano Inferior da Formação Ponta Grossa. Tal assinatura pode ser empregada em correlações entre rochas geradoras e/ou potencialmente geradoras, entre essas rochas e hidrocarbonetos eventualmente encontrados na Bacia do Paraná.