



UFF – UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

CARLOS AUGUSTO FRANCO SARAIVA

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO POTI COM
BASE EM DADOS GAMAESPECTRAIS MEDIDOS EM AMOSTRAS
DE CALHA DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO
PARNAÍBA**

ORIENTADOR
PROF. Ph.D. ANTONIO FERNANDO MENEZES FREIRE

COORIENTADORA
B.SC. JENIFFER ALVES NOBRE

Niterói, RJ

2022

CARLOS AUGUSTO FRANCO SARAIVA

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO POTI COM
BASE EM DADOS GAMAESPECTRAIS MEDIDOS EM AMOSTRAS
DE CALHA DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO
PARNAÍBA.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Programa de Graduação em Geofísica do
Departamento de Geologia e Geofísica da
Universidade Federal Fluminense como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Bacharel em Geofísica.

ORIENTADOR
PROF. Ph.D. ANTONIO FERNANDO MENEZES FREIRE

COORIENTADORA
B.SC. JENIFFER ALVES NOBRE

Niterói, RJ

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S243i Saraiva, Carlos Augusto Franco
INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO POTI COM BASE EM
DADOS GAMAESPECTRAIS MEDIDOS EM AMOSTRAS DE CALHA DA ÁREA DO
PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA / Carlos Augusto Franco
Saraiva. - 2022.
91 f.

Orientador: Antonio Fernando Menezes Freire.
Coorientador: Jeniffer Alves Nobre.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação)-Universidade
Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2022.

1. Geofísica. 2. Gamaespectrimetria. 3. Perfis Geofísicos
de poços. 4. Geoquímica. 5. Produção intelectual. I.
Freire, Antonio Fernando Menezes, orientador. II. Nobre,
Jeniffer Alves, coorientadora. III. Universidade Federal
Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

CARLOS AUGUSTO FRANCO SARAIVA

**INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO POTI COM
BASE EM DADOS GAMAESPECTRAIS MEDIDOS EM AMOSTRAS
DE CALHA DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO
PARNAÍBA.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Programa de Graduação em Geofísica do
Departamento de Geologia e Geofísica da
Universidade Federal Fluminense como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Bacharel em Geofísica.

Aprovado em 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Antonio Fernando Menezes Freire (Orientador - GGO/DOT - UFF)

B.Sc. Jeniffer Alves Nobre (Coorientadora – DOT/UFF)

M.Sc. Ricardo de Melo Pereira (Petrobras)

Prof. Dr. Francisco Romério Abrantes Junior (GGO/DOT - UFF)

Niterói, RJ

2022

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Célia pelo amor e apoio incondicional que sempre me foi dado. À toda minha família pelo suporte também, principalmente minha irmã Tammy, meu primo André e minha dinda Madalena.

Aos meus primos Daniel, Bruna e Letícia por fazerem parte da minha vida desde que me lembro e por compartilharem comigo tantos momentos felizes.

Aos meus amigos Daniel P., Estevão, Gaby, Jasmin, Luciana, Rapha por estarem sempre presentes, me encher de boas energias e sair para praia ou tomar açaí.

Aos amigos do Bra-Fra, Ana Roza, Ana Luisa, André, André Luis, Kathelen, Diogo, Julia, que dividi o ensino médio e trago até hoje.

Aos amigos que fiz na faculdade Carol, Gustavo, Fernanda, Breno, Hugo, Paulo, Rivas, Ana Paula, Marcos.

Aos grandes amigos e mentores que a geofísica me deu Julia, Raquel, Moreno, Victoria, Bruna, Tone e tantos outros, as vezes já citados em outros tópicos, que servem de inspiração desde meu ingresso na geofísica.

A todos professores que contribuíram positivamente com minha formação independente de qual fase de escolaridade tenha sido. Ainda assim, destaco a grande contribuição dos meus professores Alberto Lazaronni e Mara Kelly. Foram professores no fundamental e no ensino médio. Eu os devo o meu gosto pela escola/ universidade.

A todos funcionários da UFF em especial os do Instituto de Geociências representados pela nossa querida secretária da graduação Ana Paula que contribui efetivamente com a vida acadêmica de todos os alunos do curso de geofísica.

A todos grupos/ Instituições da UFF que me receberam durante o tempo de graduação. Foi uma honra poder aproveitar tão intensamente o tempo de graduação e poder ter participado de tantos grupos e conhecido tanta gente boa. Meus cumprimentos à Casa da Descoberta, à Horizonte, à GSS e ao GIECAR, claro, por me receberem e contribuírem com minha formação.

Ao meu orientador Fernando Freire por ter confiado em mim para realizar essa pesquisa durante esse tempo, por todo apoio e por ter me orientado nos últimos três anos de graduação. À minha coorientadora Jeniffer Nobre por estar sempre disposta a ajudar e por ter me guiado e ensinado sobre a gamaespectrometria.

A banca composta pelo professor Dr. Francisco Abrantes, M.Sc. Ricardo Pereira por aceitarem participar e contribuir dessa parte tão importante da vida acadêmica de qualquer estudante universitário.

Ao Projeto Parnaíba por ter contribuído imensamente com minha formação. Participar de um grupo tão interdisciplinar foi uma das melhores experiências da universidade. Sou muito grato pelos amigos, outros pesquisadores, ex-pesquisadores e professores do grupo: Lidia, Luiza, Filipe, Ricardinho, Ramir, Deyse, Barbara, Murilo, Guilherme, Bruna, Luanne, Pedro, Leo, Laura, Bruno, professor Cleverson, professor Francisco, professora Carla, Julia, professora Ruth, professor Victor.

Agradeço a ANP por dispor dos dados técnicos de perfis geofísicos de poços, essenciais ao trabalho; à ENEVA por ceder as amostras de calha para universidade, material central do trabalho desenvolvido; ao Trace K2 por contribuir como plataforma para interpretação de perfis de poço; ao GIECAR pela oportunidade de participar de um projeto e ter contato com profissionais muito mais experientes, professores especialistas e outros colegas de IGEO; ao CNPq pelo tempo de bolsa e fomento à pesquisa; à Petrobras pelo tempo de bolsa e fomento à pesquisa. A combinação desses recursos e mais alguns foi determinante para obtenção dos resultados aqui mostrados.

“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”

— Carl Sagan

RESUMO

Saraiva, Carlos Augusto Franco. **INTERPRETAÇÃO PALEOAMBIENTAL DA FORMAÇÃO POTI COM BASE EM DADOS GAMAESPECTRAIS MEDIDOS EM AMOSTRAS DE CALHA DA ÁREA DO PARQUE DOS GAVIÕES, BACIA DO PARNAÍBA**. Monografia, Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ, Brasil, 91 p. 2022.

A Bacia do Parnaíba, com mais de 600 mil quilômetros quadrados, é uma das maiores bacias sedimentares brasileiras. Apesar do seu porte pode-se considerá-la pouco explorada. Considerada ainda uma fronteira exploratória, o desenvolvimento de novas tecnologias se torna possível. Este trabalho busca realizar uma caracterização paleoambiental e paleodeposicional da Formação Poti, principal reservatório do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba. Os resultados puderam ser gerados graças as amostras de calha cedidas a universidade pela Eneva S.A., e dos perfis geofísicos de poços fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Foi desenvolvido um fluxo de trabalho contando com as etapas de aquisição, ajuste de profundidade, filtragem e interpretação dos dados gamaespectrais de laboratório. Foram utilizados 5 poços da região do Parque dos Gaviões. Cinco ciclos de aporte detrítico e afogamento puderam ser identificados. Para além disso, foi proposta uma correlação dos eventos de aporte detrítico entre os poços utilizados. Os ciclos de aporte e afogamento em conjunto com os perfis geofísicos, corroboram a bibliografia levantada sobre a formação e sugerem a transição de um ambiente de maior energia para um ambiente mais restrito, de menor energia. Por fim, essa metodologia inédita se mostrou eficiente e de baixo custo, podendo vir a ser uma ferramenta prática para uso em laboratório e em plataformas, conferindo maior robustez aos estudos estratigráficos, mesmo em poços onde não seja corrido o perfil de raios gama espectral a poço aberto.

Palavras-chave: Amostras de calha; Gamaespectrometria; Formação Poti; Bacia do Parnaíba; Perfis Geofísicos de Poços.

ABSTRACT

Saraiva, Carlos Augusto Franco. **PALEOENVIRONMENTAL INTERPRETATION OF THE POTI FORMATION BASED ON GAMMASPECTRAL DATA MEASURED IN CUTTING SAMPLES FROM THE *PARQUE DOS GAVIÕES* AREA, PARNAÍBA BASIN.** Monography, Fluminense Federal University. Niterói, RJ, Brazil, 91 p. 2022.

The Parnaíba Basin, with more than 600 thousand square kilometers, is one of the largest sedimentary basins in Brazil. Despite its size, it can be considered little explored. And still considered an exploratory frontier, the development of new technologies becomes possible. This work seeks to carry out a paleoenvironmental and paleodepositional characterization of the Poti Formation, the main reservoir of Parque dos Gaviões, Parnaíba Basin. The results could be generated thanks to cutting samples provided to the university by Eneva S.A., and the geophysical well-logs provided by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). A workflow was developed with the steps of acquisition, depth adjustment, filtering and interpretation of laboratory spectral gamma-ray data. Five wells from *the Parque dos Gaviões* region were used. On them five cycles of detrital input and drowning cycles could be identified. Furthermore, a correlation of detrital input events between wells was proposed. The detrital input and drowning cycles, together with the geophysical well-logs, corroborate the bibliography raised on the Formation and suggest the transition from a higher energy environment to a more restricted environment, with lower energy. Finally, this unprecedented methodology proved to be efficient and low-cost, and may become a practical tool for use in the laboratory and on platforms, providing greater robustness to stratigraphic studies, even in wells where the spectral gamma-ray profile is not run in open hole.

Keywords: Cutting samples; Gamma spectrometry; Poti Formation; Parnaíba Basin; Wireline logs.

Lista de Figuras

Figura 1: Localização da Bacia do Parnaíba e da Área do Parque dos Gaviões (Modificado do BDEP/ ANP).....	19
Figura 2: Os 3 principais lineamentos do embasamento da Bacia do Parnaíba: Lineamento Tocantins-Araguaia Lineamento Picos-Santa Inês, Lineamento Transbrasiliano, os arcos de Tocantins, Ferrer - Urbano Santos e de São Francisco, os Limites e principais estruturas na bacia do Parnaíba (Fonte: Pereira et al., 2020 apud de Fernandes, 2011, Milani e Zalan, 1998, apud Ferreira, 2018, Fortes, 1978 apud Santos e Carvalho, 2009).....	21
Figura 3: Principais lineamentos da bacia (à esquerda). O dado magnético interpretado e na direita abaixo, o dado gravimétrico, mostrando as mesmas direções estruturais (à direita acima) (Fonte: Barbosa, 2021 apud Santos et al., 2019).	22
Figura 4: Carta crono-estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007).	24
Figura 5: Imagem diagrama para visualização da disposição das camadas sedimentares e magmáticas que compõem o sistema petrolífero em questão (Sumário Geológico, ANP 2015)	31
Figura 6: Diagrama dos principais plays da Bacia do Parnaíba, na área do Parque dos Gaviões. Fonte: Modificado de Santos et al., 2022 apud Lopes (2019).	32
Figura 7: Intervalo de energia da contagem total de raios gama e dos espectros K, U e Th. Fonte: IAEA 2010.....	34
Figura 8: Características, associações e ocorrência dos elementos K, Th e U, adaptado de Klaja e Dudek (2016) apud Pereira et al 2020.....	37
Figura 9: Importância geológica das razões espectrais (adaptado de Fertl, (1979) apud Pereira et al 2020).....	38
Figura 10: Identificação de eletrofacies e correção da Formação Poti. Tabela de características de cada eletrofacies identificada e mapa de correlação (Adaptado de Souza et. al., 2022).	42
Figura 11: Exemplo de peneira vibratória utilizada em sonda para amostragem de rocha e filtragem de cascalho (Modificado de Swaco, 2013 apud Fagundes et al., 2018)	43

Figura 12: Representação da disposição das amostras de calha na caixa (1) e exemplificação da numeração de cada amostra correspondente à profundidade de perfuração (2). Fonte: Do autor.	44
Figura 13: Gamaespectrômetro RS-230 - RadiationSolutions (Nobre, 2019)	46
Figura 14: Estatística comparativa entre equipamentos A e B (Fonte: Do Autor)	46
Figura 15: Amostra padrão de areia monazítica (Nobre, 2019).....	47
Figura 16: Crossplots dos dados output dos dois equipamentos em mesmos gráficos para efeito de comparação (Fonte: Do autor).....	48
Figura 17: Fluxo básico de trabalho no grupo de projeto e proposta de fluxo de trabalho para os dados gamaespectrais (Fonte: Do Autor)	49
Figura 18: Ambiente de trabalho de aquisição de dados; equipamento e amostra dentro da malha de chumbo (Fonte: Do autor).....	51
Figura 19: Comparação do perfil de raios-gama adquirido no intervalo em estudo, após remoção das soleiras de diabásio, suavizado com filtro gaussiano, aplicando diferentes janelas (Miranda 2014)	52
Figura 20: Comparação entre os diferentes filtros calculados e exemplificação utilizando a curva de razão Th/U (Fonte: Do Autor)	53
Figura 21: Crossplots realizados para comparação da correlação dos dados gamaespectrais de laboratório antes e após aplicação do filtro de suavização (Fonte: Do Autor).....	54
Figura 22: Esquema representativo da relação entre as amostras de calha e o tempo de retorno delas (Naganawa, 2020).	56
Figura 23: Curva verde GR corrido em poço aberto (poço 1-OGX-93-MA); Curva vermelha Total Gama de laboratório. Evidenciado o descompasso entre as curvas (Fonte: Acervo pessoal Jeniffer Nobre).....	57
Figura 24: Curva verde GR corrido em poço aberto; Pontos Total Gama de laboratório. Ambiente do Software de ajuste de profundidade (Fonte: Do autor).....	58
Figura 25: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-49. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.	61

Figura 26: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço PGN-5. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.	62
Figura 27: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-101. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.	63
Figura 28: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-110. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.	65
Figura 29: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-93. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.	66
Figura 30: Interpretações paleoambientais e zoneamento da Fm. Poti no poço OGX-49, feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório, adquiridos a partir de amostras de calha; redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.....	69
Figura 31: Interpretações paleoambientais do poço PGN-5 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.....	72
Figura 32: Interpretações paleoambientais do poço OGX-101 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.....	74
Figura 33: Interpretações paleoambientais do poço OGX-110 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.....	76
Figura 34: Interpretações paleoambientais do poço OGX-93 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.....	78

Figura 35: Correlação estratigráfica com base nos elementos radioativos de K, U e Th e suas razões.....	80
Figura 36: Correlação quimioestratigráfica da Formação Poti (Fonte: Ribeiro et al 2021).....	80

Lista de Tabelas

Tabela 1: Exemplificação do resultado dos ajustes de profundidades realizados (Fonte: Do autor).....	59
Tabela 2: Dados estatísticos do poço OGX-49 antes e depois do tratamento de dados.	60
Tabela 3: Dados estatísticos do poço PGN-5 antes e depois do tratamento de dados.	62
Tabela 4: Dados estatísticos do poço OGX-101 antes e depois do tratamento de dados.	64
Tabela 5: Dados estatísticos do poço OGX-110 antes e depois do tratamento de dados.	64
Tabela 6: Dados estatísticos do poço OGX-93 antes e depois do tratamento de dados.	66
Tabela 7: Intervalos da Formação Poti e ocorrência das soleiras nos poços.....	67

ABREVIações

AT10 – Perfil de resistividade rasa

AT30 – Perfil de resistividade média

AT90 – Perfil de resistividade profunda

Ca – Cálcio

Cu – Cobre

DTCO – Perfil sônico

FS – Superfície de Inundação

GR – Perfil de raios gama

SGR – Perfilagem gamaespectral

HCAL – Calibre do poço

K – Potássio

LTB – Lineamento Transbrasiliano

NPOR – Perfil de nêutrons ou Neutrão

P – Fósforo

RHOZ – Perfil de densidade

Sr – Estrôncio

Th – Tório

Th/K – Razão tório/ potássio

Th/U – Razão tório/ uranio

Ti – Titânio

U – Urânio

U/K – Razão uranio/ potássio

Y – Ítrio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	19
3	CONTEXTO GEOLÓGICO	19
3.1	Evolução Tectônica e Estruturas Maiores.....	20
3.2	Litoestratigrafia	22
3.2.1	Sequência Rift (Grupo Jaibaras).....	22
3.2.2	Sequência Siluriana	25
3.2.3	Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera	25
3.2.4	Sequência Neocarbonífera-Eotriássica.....	27
3.2.5	Sequência Jurássica	28
3.2.6	Sequência Cretácea	28
3.3	Sistema Petrolífero	29
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	32
4.1	Radiação Natural Gama.....	32
4.2	Espectro da Radiação Natural Gama	33
4.3	Características Geoquímicas dos Elementos da Radiação Gama.....	34
4.3.1	Potássio (K)	34
4.3.2	Urânio (U)	35
4.3.3	Tório (Th)	36
4.4	ELETROFÁCIES.....	40
5	MATERIAIS.....	43
5.1	Amostras de Calha	43
5.2	Equipamento Gamaespectrômetro	45
6	MÉTODOS.....	49
6.1	Aquisição de Dados	50

6.2 Tratamento de Dados	51
6.3 Ajuste de Profundidades	54
7 RESULTADOS.....	59
8 DISCUSSÕES.....	67
9 CONCLUSÕES.....	82
10REFERÊNCIAS.....	84

1 INTRODUÇÃO

A radioatividade gama natural (GR) tem sido usada há muito tempo na exploração de óleo e gás, a fim de distinguir diferentes graus de argilosidade das rochas sedimentares (Ayres & Theilen, 2001). A utilização de dados de GR é uma das mais importantes ferramentas por sua capacidade de inferir litologias. Avanços tecnológicos subsequentes permitiram determinar, individualmente, os principais elementos que compõem o espectro da radiação total natural dentro de uma Formação. Contudo, devido ao custo elevado de perfilagens gamaespectrais (*Spectral Gamma Ray* - SGR), essas operações são restritas a determinados poços de petróleo (Nobre, 2019). O espectro da radiação gama natural é devido ao subproduto do decaimento dos elementos potássio (^{40}K), tório (^{232}Th) e urânio (^{238}U).

A integração utilizando perfis de poços e dados gamaespectrais gerados em laboratórios são realizadas com o intuito de balizar as interpretações geológicas. Os perfis geofísicos nesse estudo foram necessários, uma vez que, a amostragem geológica realizada durante a perfuração (como as amostras de calha) gera um registro com algumas incertezas associadas relativo à Formação encontrada (Rider, 2002), visto que a amostragem é feita de maneira intervalar, e não pontual.

Mud Logging Avançado (MLA) são medições diretas em amostras de calha e a obtenção de propriedades petrofísicas, como densidade, porosidade, mineralogia, ente outras, em uma escala de amostras (Marsala, 2013). Um dos principais desafios do MLA, e da análise de fragmentos em geral, é avaliar a profundidade exata de onde as amostras são originadas. Incertezas sobre a mudança de profundidade podem ser reduzidas através da comparação com o SGR correspondente, obtido a partir de perfis de poços (Marsala, 2013).

Nesta pesquisa é proposto um fluxo de trabalho para o tratamento de dados gamaespectrais, a partir de amostras de calha. Foram realizados ajustes de profundidade, utilizando dados espectrais e a curva GR obtida a poço aberto. Um filtro de suavização foi criado e aplicado nas curvas espectrais e diversas etapas de controle de qualidade foram executadas. O fluxo se mostrou promissor para o estudo de interpretação paleodeposicional e paleoclimática em reservatórios areníticos da Formação Poti, realizado em cinco poços da região do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba (Figura 1).

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é a caracterização do paleoambiente e inferência de zoneamentos da Formação Poti, principal reservatório de gás na área do Parque dos Gaviões. Para alcançar o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Ajuste de profundidade dos dados de amostras de calha;
- Suavização das curvas gamaespectrais;
- Correlação dos dados gamaespectrais com perfis geofísicos de poços;
- Correlação dos poços utilizados;
- Correlação com *proxies* geoquímicas desenvolvidas em trabalhos anteriores.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A Bacia do Parnaíba está situada entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil (Figura 1). Trata-se de uma bacia intracratônica relativamente rasa, cujo depocentro atinge a profundidade máxima de 3.500 metros (Vaz *et al.*, 2007). Também chamada de Bacia do Meio-Norte, sua extensão abrange os estados do Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará, Ceará e Bahia, tendo uma área aproximada de mais de 600.000 km². O material estudado e o trabalho desenvolvido são advindos da região do Parque dos Gaviões, importante área produtora de gás da bacia.

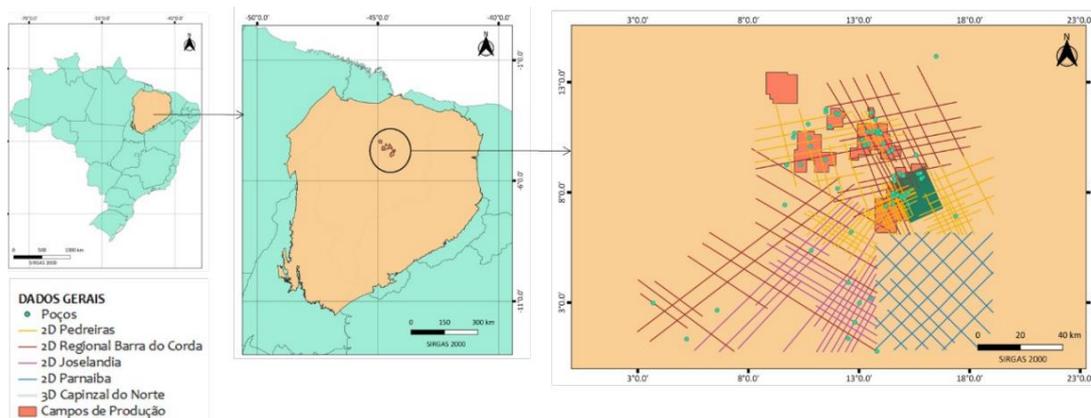


Figura 1: Localização da Bacia do Parnaíba e da Área do Parque dos Gaviões (Modificado do BDEP/ ANP).

A Bacia do Parnaíba foi desenvolvida sobre um embasamento continental durante o Estágio de Estabilização da Plataforma Sul-Americana (Almeida & Carneiro, 2004). Deduz-se que o substrato da bacia é constituído de rochas metamórficas, ígneas e sedimentares – predominantemente formadas entre o final do Proterozoico e o início do Paleozoico (Vaz *et al.*, 2007).

3.1 Evolução Tectônica e Estruturas Maiores

A origem ou subsidência inicial da bacia provavelmente está ligada às deformações e eventos térmicos pós-orogênicos do Ciclo Brasileiro (Vaz *et al.*, 2007). Vetorazzi (2012) também apresenta que a gênese da bacia está ligada aos pulsos terminais e aos eventos térmicos do ciclo Brasileiro e de estágios de estabilização da plataforma, que originaram estruturas grabeniformes, que controlaram o depocentro inicial da bacia. Os lineamentos Pico-Santa Inês, Tocantins-Araguaia e o Transbrasiliano (LTB) são as três estruturas mais importantes da bacia (Vetorazzi, 2012; Figura 2).

O Lineamento Transbrasiliano é uma megaestrutura de importância majoritária na formação da Plataforma Brasileira, com cerca de 2700 km de extensão, abrigando falhas de diferentes regimes estruturais e corpos ígneos orientados em NE-SW (Cunha, 1986).

Sabe-se ainda que essa estrutura foi responsável pela sutura de duas massas continentais, representadas pelo Cráton do Amazonas e pelo Cráton do São Francisco (Cordani & Sato, 1999). De acordo com Cordani *et al.* (1982), a LTB representa um complexo de falhas normais, transcorrentes, altos estruturais e grabéns com eixos paralelos às falhas.

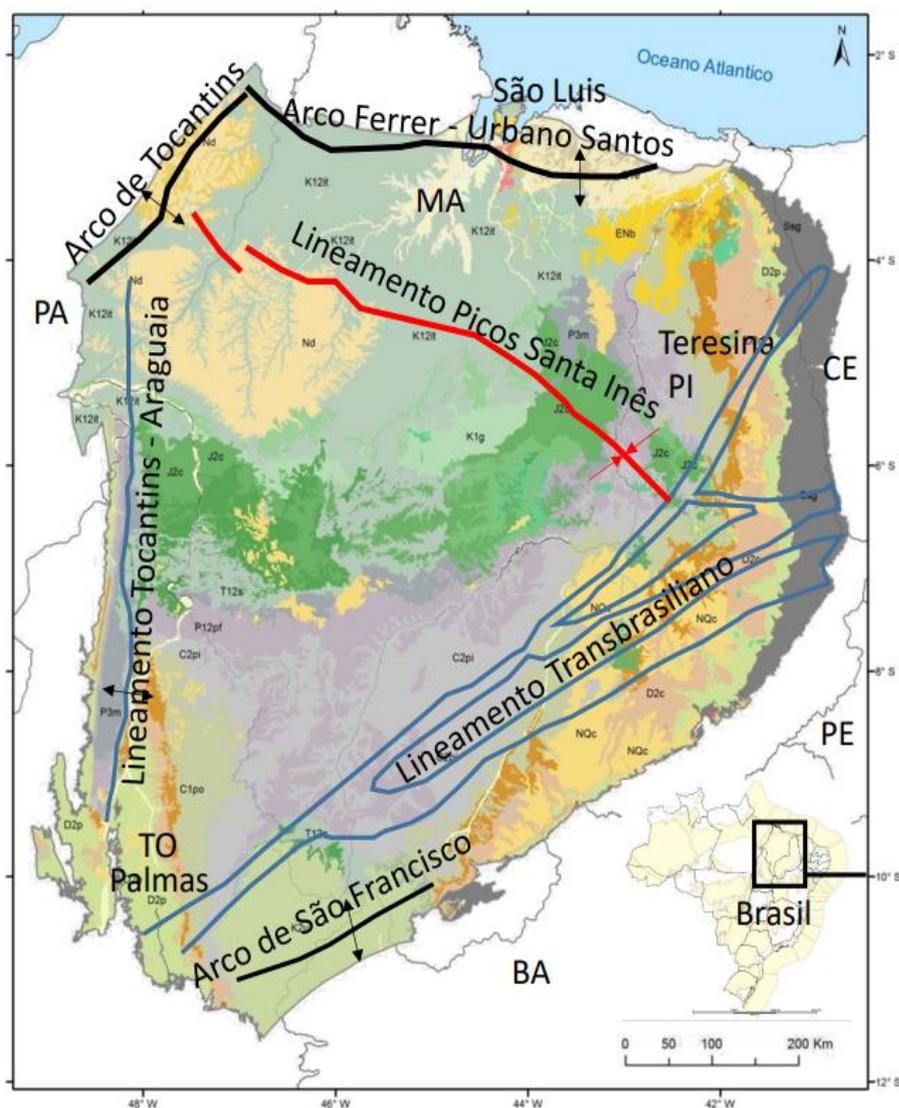


Figura 2: Os 3 principais lineamentos do embasamento da Bacia do Parnaíba: Lineamento Tocantins-Araguaia, Lineamento Picos-Santa Inês, Lineamento Transbrasiliano, os arcos de Tocantins, Ferrer - Urbano Santos e de São Francisco, os Limites e principais estruturas na bacia do Parnaíba (Fonte: Pereira et al., 2020 apud de Fernandes, 2011, Milani e Zalan, 1998, apud Ferreira, 2018, Fortes, 1978 apud Santos e Carvalho, 2009).

O Lineamento Tocantins-Araguaia, de formação permiana, ocorreu devido à antéclise Tocantins-Araguaia e à elevação do Arco Tocantins, encerrando a conexão entre as bacias do Amazonas e Parnaíba (Santos & Carvalho, 2009).

Já o Lineamento Picos-Santa Inês é uma faixa por cataclada disposta em sentido NW-SE, disposta transversalmente em relação ao Lineamento Transbrasiliano. Esta faixa reflete na morfologia contemporânea através uma série de alinhamentos orientados para NW (Vetorazzi, 2012).

Interessante perceber na Figura 3 que os lineamentos na região do Parque dos Gaviões se comportam em conformidade com as os principais lineamentos da Bacia do Parnaíba, evidenciado por Barbosa (2021), utilizando dados potenciais.

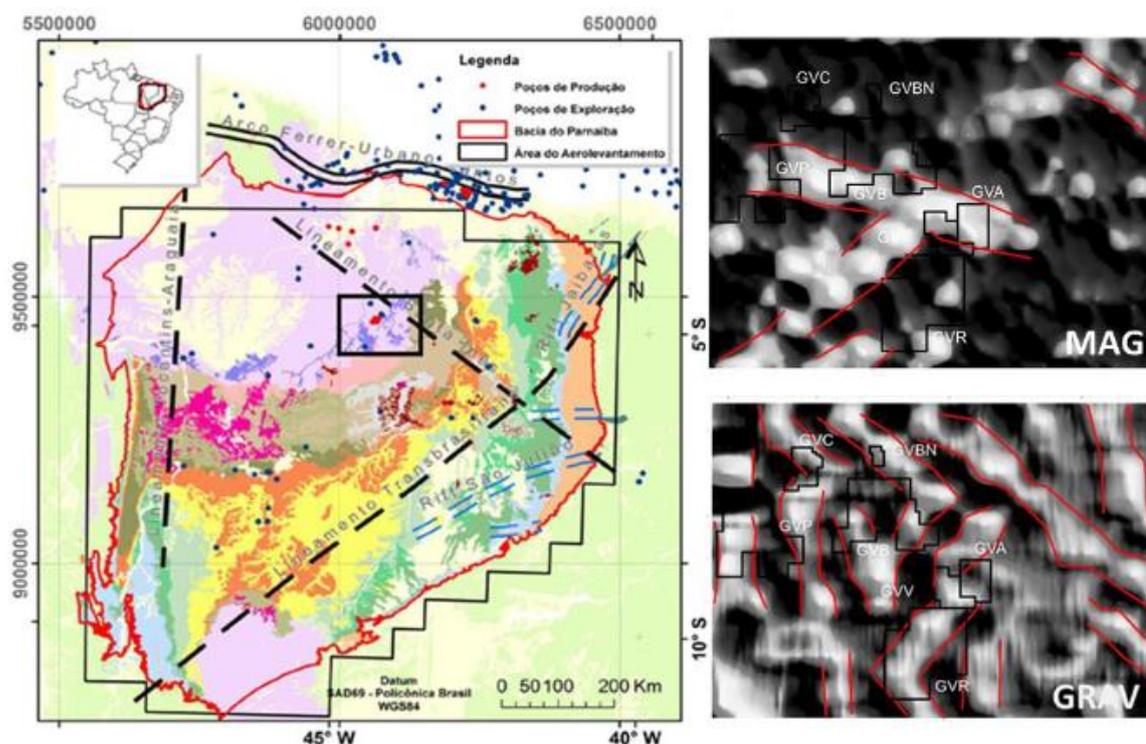


Figura 3: Principais lineamentos da bacia (à esquerda). O dado magnético interpretado e na direita abaixo, o dado gravimétrico, mostrando as mesmas direções estruturais (à direita acima) (Fonte: Barbosa, 2021 apud Santos et al., 2019).

3.2 Litoestratigrafia

A história sedimentar da Bacia do Parnaíba pode ser dividida em quatro Supersequências Paleozoicas e duas Mesozoicas (Góes *et al.* 1990; Góes & Feijó 1994; Vaz *et al.* 2007; Miranda *et al.* 2018). O preenchimento sedimentar da bacia vai do Cambriano até o Cretáceo e pode ser subdividido da seguinte forma: Rift, Sequência Siluriana, Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera, Sequência Neocarbonífera-Eotriássica, Sequência Jurássica e Sequência Cretácea (Vaz *et al.* 2007; Miranda *et al.* 2018) (Figura 4).

3.2.1 Sequência Rift (Grupo Jaibaras)

Como referenciado por Miranda *et al.* (2018), a fase Rift apresenta fina camada de sedimentação siliciclástica e vulcanoclástica de rochas de idade cambriana. De mesma idade, o Grupo Jaibaras está ligado à gênese da bacia e é considerado por Vaz *et al.* (2007) como componente do embasamento.

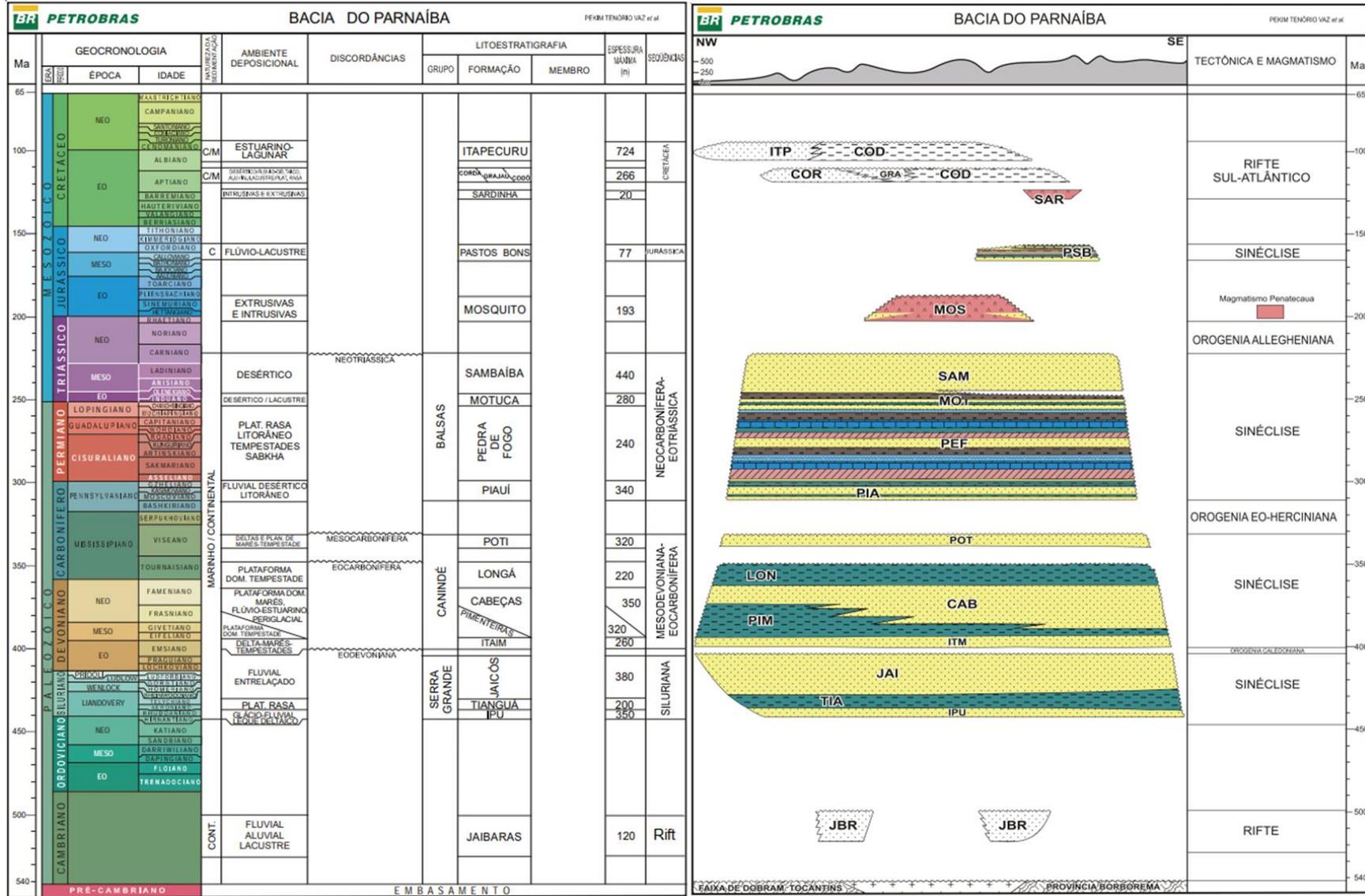


Figura 4: Carta crono-estratigráfica da Bacia do Parnaíba (Vaz et al., 2007).

3.2.2 Sequência Siluriana

Esta é a sequência que se assenta acima do embasamento da Bacia do Parnaíba. Está associada a um ciclo transgressivo-regressivo completo e corresponde litoestratigraficamente ao Grupo Serra Grande (Small *et al.* 1914; Vaz *et al.* 2007).

O Grupo Serra Grande pode ser subdividido em três formações, de acordo com Caputo (1984). São estas as formações Ipú, Tianguá e Jaicós. A unidade mais antiga, Ipú, possui rochas de grande variedade de ambientes, de glacial proximal a glacio-deltaico, leques ou frentes deltaicas (Caputo *et al.* 1984). Além disso é composta por arenitos com seixos, conglomerados com matriz areno-argilosa e matacões de quartzo ou quartzito e arenitos de finos a grossos.

A deposição da Formação Tianguá se deu num ambiente de plataforma rasa (Góes & Feijó, 1994). Seus contatos com as camadas das formações Ipu (sotoposta) e Jaicós (sobreposta) são concordantes (Caputo, 1984). A Formação Tianguá representa a superfície de inundação máxima e as camadas Jaicós, o intervalo regressivo dessa sequência, cujas facies indicam deposição por sistemas fluviais, deltaicos e plataformais, em ambientes continental, transicional e marinho raso (Góes & Feijó, 1994).

A Formação Jaicós é constituída de arenitos cinza com tonalidades claras, creme ou amarronzada, grossos, contendo seixos angulares a subangulares, mal selecionados, friáveis, maciços ou com estratificação cruzada ou lenticular (Caputo, 1984), depositados em sistemas fluviais entrelaçados (Góes & Feijó, 1994).

3.2.3 Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera

Quanto à litoestratigrafia, é composta pelo Grupo Canindé, que está dividido em quatro formações. É representada litoestratigraficamente pelo Grupo Canindé. Este é composto, da base para o topo, pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeça, Longá e Poti. Esta sequência pode ser interpretada como resultado de ao menos dois ciclos transgressivos-regressivos completos (Miranda, 2014).

Na base da Formação Itaim observa-se um maior número de intercalações de folhelhos bioturbados. Ademais, nota-se uma granocrescência ascendente (Della

Fávera, 1990). Os sedimentos dessa Formação foram depositados em ambientes deltaicos e plataformais, dominados por correntes induzidas por processos de marés e de tempestades (Góes & Feijó, 1994).

A Formação Pimenteiras corresponde ao mais importante episódio de transgressão registrado na bacia, responsável pela deposição de significativos pacotes de folhelhos pretos e cinzas, localmente bioturbados, durante o Givetiano-Frasniano. As rochas microclásticas estão intercaladas com delgadas camadas de arenito, ambas associadas a uma plataforma dominada por tempestade. Os padrões de perfis elétricos no intervalo Pimenteiras sugerem uma deposição cíclica, relativamente comum em ambientes de baixa energia. A Formação Pimenteiras corresponde ao principal intervalo gerador da bacia (Vaz *et al.* 2007; Miranda, 2014).

As feições grafoelétricas indicam ciclicidade deposicional e uma mudança de tendência transgressiva para regressiva na passagem gradacional para a Formação Cabeças, que lhe é sobreposta (Della Fávera, 1990; Vaz *et al.* 2007). Esta Formação consiste predominantemente de arenitos e denota um ambiente glacial ou periglacial (Caputo, 1984). Um ambiente plataformal sob a influência preponderante de correntes desencadeadas por processos de marés é defendido por Góes e Feijó (1994) como o mais importante nessa unidade. Facies do tipo flúvio-estuarinas também são possíveis.

Apesar de ser predominantemente composta por facies de baixa energia, a Formação Longá exibe em sua porção média um pacote de arenitos e siltitos cinza-claros a esbranquiçados, laminados (Lima & Leite, 1978). Góes e Feijó (1994) indicam ainda um ambiente plataformal dominado por tempestades.

Segundo Lima e Leite (1978), a Formação Poti pode ser subdividida em duas partes. A parte inferior é composta, em sua maior parte, de arenitos cinza esbranquiçados, médios, com lâminas dispersas de siltito cinza-claro. Já sua parte superior por arenitos cinza, lâminas de siltitos e folhelhos com eventuais níveis de carvão, mostrando um caráter mais lamoso no topo.

A deposição ocorreu em deltas e planícies de maré, às vezes sob a influência de tempestades (Góes e Feijó, 1994). O contato superior com a Formação Piauí é discordante, erosivo.

Caputo (1984) subdivide a Formação Poti em quatro seções. Na ordem de deposição, a primeira representa paleoambientes de antepraia (*shoreface*) e frente deltaica, sucedida por planícies aluviais periglaciais dadas as características de estratificação cruzada de baixo ângulo dos arenitos. A segunda unidade, composta por sucessões de folhelhos e siltitos, pode representar paleolagos isolados. A terceira unidade, composta por arenitos e diamictitos, é interpretada como depósitos de planície de *outwash*. A quarta unidade, superior, composta por siltitos e diamictitos, pode representar paleoambientes lacustres e glaciais.

Góes (1995) identificou no topo da Formação Poti evidências de controles tectônicos, com canais fluviais bruscamente recobertos por depósitos de maré, em rápido afogamento do sistema, precedendo a grande discordância erosiva entre o Mississipiano e o Pensilvaniano. Cruz *et al.* (1973) reconhecem blocos soerguidos na borda sul da bacia, relacionados por Castelo Branco & Coimbra (1984) ao arqueamento do Alto do Parnaíba, enquanto Góes & Feijó (1994) atribuem a efeitos da Orogenia Eoherciniana.

3.2.4 Sequência Neocarbonífera-Eotriássica

Suas quatro formações serão tratadas da mais antiga para a mais nova. São elas: a Piauí, a Pedra de Fogo, a Motuca e a Sambaíba, compondo assim o Grupo local Balsas (Modificado de Vaz *et al.* 2007). Segundo Melo *et al.* (1998) a Formação Piauí é Pensilvaniana (não mais antiga que o Moscoviano). Lima & Leite (1978) interpretaram um ambiente fluvial com contribuição eólica e breves incursões marinhas, num clima semi-árido a desértico

Depositada em ambiente marinho raso a litorâneo com planícies de *sabka*, sob a influência de tempestades, a Formação Pedra de Fogo, é caracterizada por sua grande variedade de rochas. Sendo algumas dessas sendo sílex, calcários, arenitos, folhelhos, siltitos, anidrita e dolomitos (Dino *et al.* 2002; Vaz *et al.* 2007).

De acordo com Góes & Feijó (1994), os sedimentos Motuca foram depositados num sistema desértico, com lagos associados. Sua idade estende-se do Permiano terminal ao início do Eotriássico (Caputo, 1984). Contudo, considerando-se a datação da Formação Pedra de Fogo, a sedimentação Motuca talvez tenha se prolongado até o final do Eotriássico (Dino *et al.* 2002).

Lima & Leite (1978) adotaram para a Formação Sambaíba uma seção do tipo que suas camadas arenosas estão posicionadas sobre a Formação Motuca e subjacentes aos basaltos. As dunas com estratificação cruzada de grande porte, contendo diversas feições típicas de sedimentos eólicos caracterizam rochas de um sistema desértico, com contribuição fluvial. Os níveis do topo, quando silicificados, tornam-se resistentes à erosão e formam mesetas (termo atribuído por Plummer 1946).

3.2.5 Sequência Jurássica

Segundo Vaz *et al.* (2007), na Sequência Jurássica está constituída somente a Formação Pastos Bons, tendo em vista que a posição estratigráfica da Formação Corda foi reinterpretada e passou a fazer parte da Sequência Cretácea.

O autor ainda indica que a subsidência que culminou com essa deposição jurássica teve como origem, ou causa fundamental, o peso das rochas básicas Mosquito, que se somou ao da carga sedimentar então existente. O final dessa fase sedimentar teria sido uma consequência das atividades tectônicas concernentes à abertura do Atlântico Equatorial.

Com base no conteúdo fossilífero (peixes, conchostráceos, ostracodes) atribui-se idade jurássica média a superior à Formação Pastos Bons, depositada em paleodepressões continentais, lacustrinas, com alguma contribuição fluvial, em clima semi-árido a árido

3.2.6 Sequência Cretácea

Esta sequência é constituída pelas Formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru. Acredita-se que esta unidade foi depositada em um sistema desértico. Vaz *et al.* (2007) descreve a Formação Corda como: estratificações cruzadas de grande porte, *climbings* transladantes e *ripples*, fluxos de grãos e outras estruturas típicas de dunas eólicas também são comuns nessa unidade. Estruturas cruzadas de baixo ângulo e cruzadas acanaladas também ocorrem.

No caso da Formação Grajaú, constata-se que quando existem basaltos subjacentes, estes fornecem material para os corpos areníticos.

Na Formação Codó, folhelhos, calcários, siltitos, gipsita/anidrita e arenito são os principais litotipos e são frequentes níveis de sílex e estromatolito. Os jazimentos de gipsita são recobertos abruptamente por folhelho bege a cinza/ preto esverdeado, revelando uma ampla inundação (transgressão) do mar/lago Codó. Rossetti *et al.* (2001b) declaram que as Formações Grajaú e Codó, ambas do Neo-aptiano-Eo-albiano, foram depositadas em ambientes marinho raso, lacustre e flúvio-deltaico. Interdigitação ou equivalência cronoestratigráfica entre essas duas formações é asseverada também por Lima & Leite (1978).

Já a Formação Itapecuru apresenta seis ciclos deposicionais correspondentes a sistemas de vales estuarinos incisos e é caracterizado por Rossetti *et al.* (2001b) como de idade Mesoalbiano-Neocretáceo. A Formação Itapecuru recobre discordantemente as Formações Grajaú e Codó, consoante Rossetti *et al.* (2001a).

Uma relação de contemporaneidade entre os depósitos das Formações Corda, Grajaú e Codó é proposta por Vaz *et al.* (2007) e foi defendida anteriormente por Rezende (2002). Num contexto mais amplo, a gênese dos depósitos das Formações Grajaú, Codó e Itapecuru estaria associada à movimentação tectônica ou ao processo de separação dos continentes sul-americano e africano no Cretáceo. Em outras palavras, manifestaria a história do Oceano Atlântico nessa área (Rossetti *et al.* 2001a).

3.3 Sistema Petrolífero

O sistema petrolífero estudado neste trabalho, pertencente à Bacia do Parnaíba, faz parte da Sequência Mesodevoniana-Eocarbonífera. Essa supersequência é composta por diversas formações como: Fm. Itaim, Fm. Pimenteiras, Fm. Cabeças, Fm Longá e Fm. Poti.

O poço escolhido para o trabalho atinge apenas profundidade equivalente à Formação Cabeças. Logo, aqui serão abordados somente as três formações: Cabeças, Longá e Poti, sendo as formações Cabeças e Poti reconhecidos como possíveis reservatórios e a Formação Longá como uma possível rocha geradora (Freire *et al.*, 2019).

A Formação Cabeças tem como sua precedente a Formação Pimenteiras que é descrita como a ingressão marinha mais importante da bacia do Parnaíba; sendo

sua sedimentação devido um ambiente plataformal raso e dominado por tempestades (Modificado de Vaz *et al.*, 2007). É possível reconhecer uma mudança gradacional da tendência antes regressiva para uma nova tendência transgressiva na Formação Cabeças (Della Fávera, 1990). Na Formação Cabeças, o litotipo predominante consiste em arenitos cinza-claros a brancos, médios a grossos, com intercalações delgadas de siltitos e folhelhos (Vaz *et al.*, 2007).

O litotipo da Formação Longá é caracterizado por folhelhos cinza-escuros a pretos, em parte arroxeados, homogêneos ou bem laminados, bioturbados (Vaz *et al.*, 2007). Esta unidade representa outra extensa ingressão marinha, mas não tão significativa como a registrada na Formação Pimenteiras (Calonio, 2020). Góes & Feijó (1994) interpretaram como um ambiente nerítico plataformal dominado por tempestades.

Já para a Formação Poti temos que a sua deposição ocorreu em deltas e planícies de maré, às vezes sob a influência de tempestades (Góes & Feijó, 1994). A denominação Formação Poti diz respeito a uma sucessão de estratos que pode ser dividido em duas porções, a inferior constituída de arenitos cinza esbranquiçados, médios, com lâminas dispersas de siltito cinza-claros, e a superior de arenitos cinza, lâminas de siltitos e folhelhos com eventuais níveis de carvão (Lima & Leite, 1978).

Outro fator muito importante para o sistema petrolífero da bacia são as rochas magmáticas, que têm participação em diversos segmentos, como trapa e maturação (Figura 5). O sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba é atípico pois trata-se de uma bacia relativamente rasa. A maturação da matéria orgânica deu-se devido ao incremento térmico acarretado por intrusões magmáticas tardias – Fm. Mosquito (Eo Jurássico) e Fm. Sardinha (Eo Cretáceo) –, ao contrário dos sistemas petrolíferos convencionais onde o calor envolvido na maturação do querogênio advém do grau de subsidência e do nível de soterramento da bacia (Calonio, 2020).

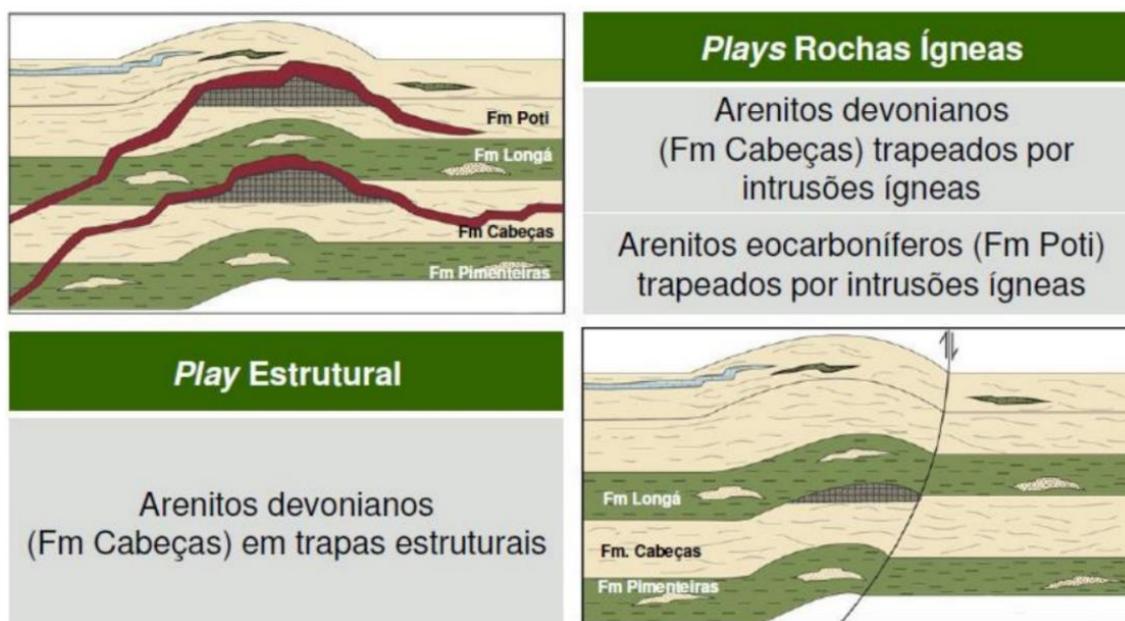


Figura 5: Imagem diagrama para visualização da disposição das camadas sedimentares e magmáticas que compõem o sistema petrolífero em questão (Sumário Geológico, ANP 2015)

Segundo Freire *et al.* (2019), na Bacia do Parnaíba existem quatro sistemas petrolíferos: Pimenteiras – Cabeças (!), Pimenteiras – Poti (!), Pimenteiras – Piauí e Tianguá – Ipu (?). Além disso, é importante entender como as rochas ígneas podem atuar nestes *plays* exploratórios do Campo dos Gaviões compostos por sistemas ígneo-sedimentares.

Lopes (2019) propõe cinco diferentes tipos de possíveis acumulações de hidrocarbonetos, dos quais quatro têm as intrusões ígneas como rocha trapeadora e selante. Em seu trabalho ele evidencia a Formação Pimenteiras como principal geradora e ilustra as possibilidades de migração do petróleo para as rochas reservatórios das formações Cabeças e Poti (Figura 6).

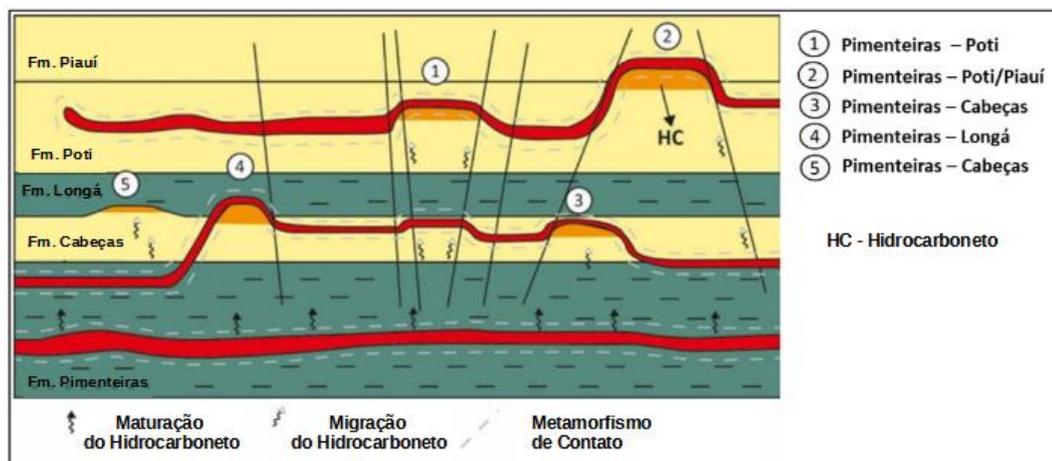


Figura 6: Diagrama dos principais plays da Bacia do Parnaíba, na área do Parque dos Gaviões. Fonte: Modificado de Santos et al., 2022 apud Lopes (2019).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Radiação Natural Gama

Radiação gama natural é aquela associada a emissão de fótons de alta energia durante o decaimento de determinados radionuclídeos. Esse tipo de energia tem sua frequência em uma faixa maior que 10^{19} Hz, comprimentos de onda sendo menores que 10^{-12} m e energia menor que 10^4 eV (McCay et al, 2014).

Esses radioelementos são presentes na maioria das rochas e tendem a possuir concentrações mais elevadas em rochas siliciclásticas de sedimentação de baixa energia (e.g. folhelhos, argilas).

A medição dos raios gama não é de acordo com o tamanho dos grãos, mas sim de sua constituição mineralógica. A leitura de raios gama de um arenito fino limpo (sem argila) é muito parecida com a de um arenito grosso da mesma mineralogia. Portanto, um arenito limpo constituído por feldspatos de potássio, micas, glauconita, monazita ou outros minerais constituídos de urânio pode dar uma alta resposta aos raios gama (Myers & Bristow, 1989; Davies & Elliott, 1996).

4.2 Espectro da Radiação Natural Gama

O registro de raios gama em poços foi introduzido no final da década de 1930, e imediatamente foi incorporada pela facilidade em distinguir formações argilosas de areias limpas (Ellis & Singer, 2007).

No entanto, as curvas espectrais (SGR) tiveram maiores estudos e começaram a ser difundidas em 1975 (Nielsen *et al.* 1987). As concentrações elementares dos três principais contribuintes para a radioatividade natural são dadas por potássio (^{40}K), urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th) (Myers & Bristow, 1989). Esse avanço, permitiu uma interpretação litológica e deposicional mais acurada pela possibilidade de distinguir a resposta de cada radioisótopo emitido pela formação, visto que o estudo da proveniência dos sedimentos começou a ser melhor embasado.

A energia dos raios gama é medida em elétrons-volt (eV), onde 1 eV é definido como a energia adquirida por um elétron no decaimento através da diferença de potencial de um volt (Parasnis, 1997, apud Sower, G. A.). Entretanto, para gamaespectrometria, são utilizadas outras unidades, como milhões de elétrons-volt (MeV), ou quilo elétrons-volt (keV). As janelas de aquisição da contagem total, potássio, urânio e tório são medidos através de energias de radiações de nuclídeos específicos, onde, o potássio tem seu próprio nuclídeo de emissão de radiação gama natural, enquanto o urânio e o tório não emitem radiação gama natural e têm como nuclídeos o bismuto (^{214}Bi) e o tálio (^{208}Tl), respectivamente (Sowek *et al.* 2013; Figura 7).

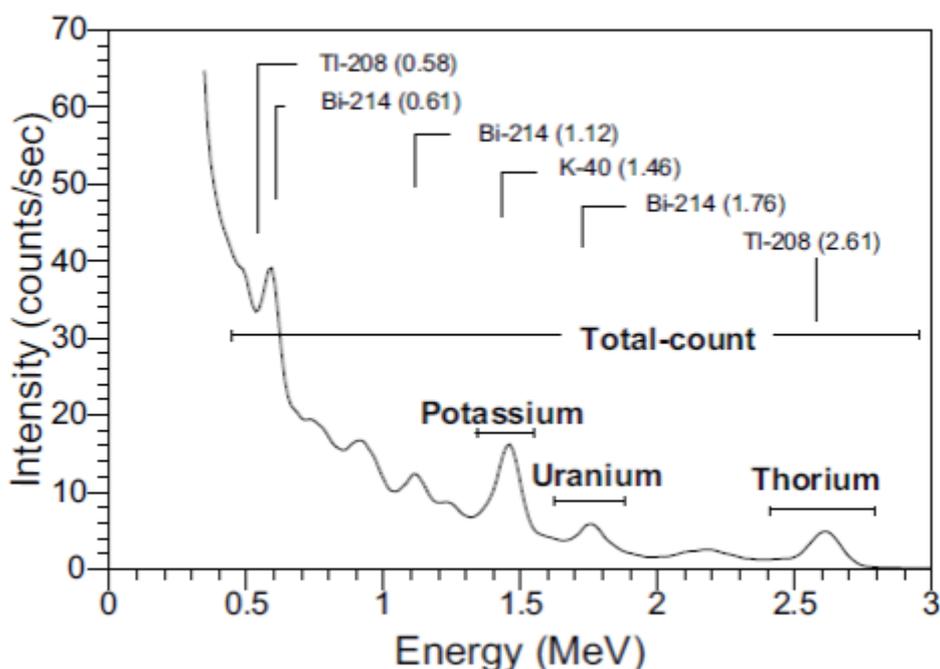


Figura 7: Intervalo de energia da contagem total de raios gama e dos espectros K, U e Th. Fonte: IAEA 2010

Com isso, é observado que a contagem total de raios gama é devida ao somatório dos elementos potássio, urânio e tório. Ainda é possível perceber que a maior intensidade de contagem é advinda do elemento potássio, o que faz sentido visto que este é um dos elementos de maior abundância na crosta terrestre e os derivados de urânio e tório são caracterizados como elementos traço.

4.3 Características Geoquímicas dos Elementos da Radiação Gama

Como mostrado anteriormente, os elementos que compõe a radiação gama apresentam diferentes características no comportamento do decaimento de suas energias. Isso é fundamental para possibilitar a identificação de cada elemento de maneira independente. Nesta seção será mostrado o que cada elemento pode inferir de informação geológica e geofísica.

4.3.1 Potássio (K)

O potássio consiste em três isótopos naturais, ^{39}K , ^{40}K e ^{41}K , com abundâncias de 93,08%, 0,0119% e 6,9% respectivamente. O único isótopo instável de potássio é o nuclídeo ^{40}K , o principal contribuinte, que emite um único raio gama

facilmente identificável a 1,46 MeV (Fertl, 1979). O teor de todos esses isótopos tem concentração na crosta da Terra aproximada em 2,59%.

A proveniência do potássio é dada pelas rochas ígneas silicosas (granito, granodiorito, riolito), onde se encontra na forma de feldspato potássico (ortoclásio, microclina), micas (muscovita, biotita) e vários outros minerais de importância secundária (Serra *et al.* 1980). Minerais como micas e feldspatos potássicos concentram a maior parte do potássio em rochas sedimentares, principalmente nas facies de areia e folhelho. Nas rochas carbonáticas, está associado a minerais argilosos micáceos e glauconita (Hassan *et al.*, 1976).

Durante o processo de alteração, feldspatos e micas são facilmente destruídos, dependendo do grau de intemperismo, gerando minerais argilosos: illita, esmectita, montmorilonita, clorita e caulinita. Como estes componentes são muito instáveis a maior parte é dissolvida e transportada pela água.

O potássio está associado à formação das argilas, tendo sua maior acumulação em ambiente de baixa energia deposicional, também está associado a outros sedimentos terrestres com baixa maturidade mineralógica (e química).

4.3.2 Urânio (U)

Existem três isótopos naturais de urânio e todos são radioativos: ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U e suas respectivas proporções na Terra são 0,0057%, 0,72% e 99,27%. Na água do mar, a concentração relativa de ^{234}U é maior porque os íons ^{238}U são seletivamente fixados no CaCO_3 . As meias-vidas dos isótopos de urânio são: 2,5 x 10⁵ anos para ^{234}U , 7,1 x 10⁸ anos para ^{235}U e 4,4 x 10⁹ anos para ^{238}U (Serra *et al.* 1980).

Os minerais que contêm urânio geralmente têm sua origem em rochas ígneas ácidas. O teor médio desse elemento na crosta é de cerca de 3 ppm. Ele é dissolvido pela alteração ou lixiviação de minerais, onde a lixiviação é predominante na presença de água rica em ácidos orgânicos (Serra *et al.* 1980; Serra, 1984).

O íon uranil forma numerosos complexos com compostos orgânicos que facilitam sua fixação pela matéria orgânica e mineral (Hassan *et al.* 1976). A alta solubilidade do íon uranil ($(\text{UO}_2)^{2+}$) é devida a sua facilidade de oxidação de ação bacteriana, o que faz com que o urânio se torne muito móvel (Serra *et al.* 1980).

4.3.3 Tório (Th)

Existe apenas um isótopo de tório de longa meia vida, o ^{232}Th , os outros isótopos, ^{234}Th e ^{230}Th são encontrados na natureza como pertencentes à série de decaimento do ^{238}U , tendo uma meia vida relativamente curta e, portanto, muito raros. A concentração média de tório na crosta terrestre é de cerca de 12 ppm. As suas fontes são rochas ígneas silícicas (granito, granodiorito, sienito, riolito), nas quais o tório existe em alguns minerais. Sua concentração média em rochas ígneas é de 3,5 até 4 vezes a do urânio, e a relação Th/U é bastante constante (Serra *et al.* 1980).

Sob condições naturais o tório possui um grau de oxidação muito estável, presente na maioria dos ambientes como um elemento traço. Em ambientes de intemperismo é praticamente insolúvel e seu produto de solubilidade, expresso como $\text{Th}(\text{OH})_4$, é próximo de 10^{-42} (Serra, 1984). Segundo Klaja & Dudek 2016, o tório é um elemento insolúvel em água e geralmente combinado a minerais pesados de rochas ígneas.

O tório está associado apenas a sedimentos detríticos, nunca a sedimentos puramente químicos, sendo encontrado em minerais de argila nos quais foi adsorvido e associado com os minerais pesados (Serra *et al.* 1980).

Na figura 8, é mostrada uma sumarização das características de cada elemento é feito de modo a facilitar o entendimento e a leitura do trabalho.

Elemento	Características	Associação	Ocorrência
Potássio (⁴⁰ K)	<ul style="list-style-type: none"> Um dos componentes básicos dos folhelhos. Indicador de presença em feldspatos e micas Ocorre principalmente na forma de K₂O. Estabiliza minerais de argila como KCl. 	<ul style="list-style-type: none"> Formação das argilas. 	<ul style="list-style-type: none"> Ambiente de baixa energia Sedimentos terrestres com baixa maturidade química. Folhelhos, argilas e evaporitos.
Tório (²³² Th)	<ul style="list-style-type: none"> Insolúvel em água. Normalmente combinado com folhelhos, pode fornecer informações sobre o teor de argila. Combinado com minerais pesados em rochas ígneas. 	<ul style="list-style-type: none"> Sedimentos detríticos. Nunca a sedimentos puramente químicos. 	<ul style="list-style-type: none"> Minerais pesados fração areia e silte Sedimentos residuais como bauxita, caulinita e bentonita
Urânio (²³⁸ U)	<ul style="list-style-type: none"> Normalmente não está ligada à contaminação de rochas por argila. Dependente do teor de matéria orgânica. 	<ul style="list-style-type: none"> Sedimentos detríticos e químicos. Matéria orgânica. Folhelhos. 	<ul style="list-style-type: none"> Adsorvido por minerais argilosos, associado à matéria orgânica. Concentração de matéria orgânica, originada por acúmulo de organismos, comuns em ambientes marinhos. Minerais pesados. Precipitados em fraturas e ambientes permeáveis.

Figura 8: Características, associações e ocorrência dos elementos K, Th e U, adaptado de Klaja e Dudek (2016) apud Pereira et al 2020.

A razão U/K geralmente é utilizada para avaliar a origem do sedimento quanto ao teor de matéria orgânica marinha. A tendência de aumento dessa razão sugere maior conteúdo de matéria orgânica marinha pois seja o aumento de U ou diminuição de K, ambos indicariam maior proveniência de um ambiente menos detrítico (Fertl, 1979; Klaja & Dudek, 2016; Nobre et al, 2020; Pereira et al, 2021, Al-Jafar & Al-Jaberi, 2021).

A razão Th/U pode ser um indicador quanto ao aporte sedimentar terrígeno e intemperismo. O aumento do teor de Th junto a redução do U indica um ambiente

detrítico (Fertl, 1979; Klaja & Dudek, 2016; Nobre et al, 2020; Pereira et al, 2021, Al-Jafar & Al-Jaberi, 2021).

A razão Th/K tem importante função quanto a caracterização da umidade do paleoambiente. O aumento da razão Th/K indica maior quantidade e deposição do argilomineral caulinita que por sua vez está ligado a um ambiente de maior umidade (Fertl, 1979; Klaja&Dudek, 2016; Nobre et al, 2020; Al-Jafar&Al-Jaberi, 2021). Na figura 9 são ilustradas algumas observações acerca das razões.

Razões	Observações
Th/K	<ul style="list-style-type: none"> • Identificação de minerais principalmente argilas. • Interpretação paleogeográfica, paleoclimática, paleoambiental e vatição de linha de costa. • Variações diagenéticas de argilas.
Th/U	<ul style="list-style-type: none"> • Varia com o ambiente deposicional. Variações do nível de base e linha de costa. • (Th/U > 7) Condição oxidante, típica do ambiente continental, solos intemperizados e marinho raso. • (Th/U < 7) Depósitos marinhos. • (Th/U < 2) Condições redutoras, folhelhos negros e fosfatos. • Correlação de poços, transgressões x regressões. • Estimativa de sedimentos argilosos e potencial rocha geradora. • Em rochas ígneas alto Th/U indicativo de oxidação do magma antes da cristalização e / ou lixiviação pós-cristalização.
U/K	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação de teor de matéria orgânica em sedimentos argilosos. • Correlação de poços. • Estimativa de sedimentos argilosos e potencial rocha geradora.

Figura 9: Importância geológica das razões espectrais (adaptado de Fertl, (1979) apud Pereira et al 2020).

Embora um pouco das características geoquímicas de cada radioisótopo já tenha sido discutido, faz-se necessário o entendimento acerca da utilização dos dados espectrais da radiação gama no desenvolvimento deste estudo. Para possíveis reconstruções paleoambientais, o comportamento natural destes elementos que compõe o espectro se torna importante para a compreensão das análises. Inicialmente, o Tório mostra características como insolubilidade em água, pode estar ligado ao conteúdo argiloso e normalmente está combinado com minerais

pesados, derivados de rochas ígneas. Já o Urânio possui íons facilmente solúveis em água e geralmente estão ligados ao conteúdo orgânico. O Potássio é um indicador da presença de feldspatos e micas, estabilizado em conteúdos argilosos como KCl (Klaja & Dudek, 2016). A partir dessas características pode-se sintetizar que o tório está possivelmente ligado aos ambientes continentais, pois não é dissolvido em meio aquoso e está associado a minerais pesados, tendo o seu transporte até o oceano feito apenas por tração, nas descargas fluviais. Tratando-se do urânio, seus cátions são facilmente ligados à matéria orgânica e, quando dissolvido em água, se associa fortemente à matéria orgânica, óxidos de ferro e aos fosfatos dissolvidos (Teixeira *et al.*, 2017). Com isso, tem-se que o elemento tório provém do ambiente continental, carregado por tração pelos rios; o urânio, hidrolisável, chegando ao oceano através dos rios por suspensão, sendo então associado possivelmente à matéria orgânica marinha; já o potássio está ligado diretamente aos argilominerais, transportado por suspensão.

Segundo Klaja & Dudek (2016), as razões Th/U podem ser empregadas para a determinação do conteúdo de argila e para o tipo de argilomineral, mas também reflete condições paleodeposicionais e paleoambientais. Uma alta relação Th/U sugere um maior aporte de sedimentos continentais, relacionado a um clima mais úmido e quente, enquanto baixos valores de Th/U sugerem uma predominância de sedimentação autóctone marinha, geralmente associada à matéria orgânica e a um clima mais seco e frio (Klaja & Dudek, 2016). Com o auxílio da razão U/K é possível relacionar o conteúdo de matéria orgânica (marinha) e o de argila (terrígena). Quando esta relação diminui há uma predominância de sedimentos terrígenos, relacionados a um maior transporte de argilas e, portanto, a um clima mais úmido. Intervalos com reduzidos valores da razão Th/U, com uma diminuição do Th em relação ao U, acompanhados por uma maior razão U/K, podem ser interpretados como episódios de afogamentos, enquanto altos valores de Th/U e baixas razões U/K podem indicar eventos progradação, mesmo em uma seção lamosa. Assim, ciclos análogos aos de progradação e retrogradação, porém em menor dimensão, podem ser bem definidos, através do agrupamento Th/U e U/K e justificados pelas variações dos perfis de U e Th, sugerindo sucessivos episódios de afogamentos e progradações em ambiente deltaico/estuarino/litorâneo (Nobre *et al.*, 2019).

4.4 Eletrofácies

A discussão deste capítulo se inicia com um estudo de eletrofácies dos cinco poços utilizados (Figura 10), sendo representados na figura. Em trabalho anterior, Souza et. at., 2022 propõe uma classificação de oito eletrofácies no intervalo da Formação Poti com base nos perfis de raios gama, resistividade profunda, densidade, neutrão e sônico compressional.

Segundo Souza, 2022, a eletrofácies PT-8 ocorre apenas nos poços PGN-5 (final do poço, sem alguns perfis) e OGX-110, representando a base da Formação Poti, sendo uma passagem transicional para a PT-7, onde ocorre uma mudança para um nível mais lamoso. Já a PT-6 indica um intervalo arenoso com matriz mais argilosa ao longo da eletrofácies analisada, com valores bem elevados no perfil do GR, concomitante aos valores de menor resistividade. A PT-5 possui uma curva de GR “mais nervosa” indicando intervalos com intercalações de arenitos e lamitos, valores relativamente altos no RT e pelo crossover RHOZ-NPHI onde, no meio deste intervalo, houve um pico de argilosidade, aproximando as curvas.

A autora ainda comenta que passagem para a PT-4 se justifica pelo crossover RHOZ-NPHI, com o GR aumentando para o topo e uma subdivisão, denominada aqui como PT-4A, resultado do metamorfismo de contato com a ígnea. Essa eletrofácies não ocorre no poço OGX-101, onde não é observada a soleira. A PT-4A ocorre nos poços PGN-5, OGX-110 e OGX-49, onde a ígnea está presente no poço. A eletrofácies PT-3 apresenta picos mais radioativos, no qual estão concentradas as camadas com maior presença de folhelhos, calibrado através das descrições das amostras de calha, além da combinação RHOZ-NPHI sem crossover. Ocorre apenas nos poços OGX-101 e OGX-49. A quebra desta zona se dá ao observarmos uma variação no tempo de trânsito deste intervalo, inferindo alguma descontinuidade, sendo o topo da PT-2, representada por um leve aumento da resistividade, sendo uma seção com maior intercalação de arenitos e lamitos. A PT-2 também só é observada, em nossa correlação, nos OGX-101 e OGX-49.

Por fim, no topo do intervalo, a curva de GR mostra que as eletrofácies inferem significativas intercalações de arenitos e lamitos em toda a extensão do reservatório, sendo o topo da formação representado pela eletrofácies PT-1, menos

argilosa, observada apenas nos poços OGX-101 e OGX-49, segundo nossa correlação. Esta correlação servirá como base para reconhecer as características paleodeposicionais e paleo ambientais nesses poços (Souza et. at., 2022).

Foi realizada uma correlação dos poços, acrescentando o poço OGX-93, mais ao sul do Parque dos Gaviões, com os mesmos fundamentos utilizados para definição das oito eletrofacies. Importante ressaltar as distâncias entre cada poço:

- PGN-5 para OGX-110: 20 quilômetros, aproximadamente;
- OGX-110 para OGX-49: 30 quilômetros, aproximadamente;
- OGX-49 para OGX-101: 30 quilômetros, aproximadamente e
- OGX-101 para OGX-93: 120 quilômetros, aproximadamente.

Apesar das grandes distâncias, a Bacia do Parnaíba é uma bacia intracratônica, o que geralmente corresponde a refletores com grandes continuidades laterais, permitindo uma correlação com poços mesmo com tal espaçamento.

Na figura 30 é possível ver a correlação entre os 5 poços, uma tabela correspondente as características de cada eletrofacies além de um mapa mostrando a direção de correlação entre os poços na área de estudo.

De antemão é perceptível a ausência de intrusão na Formação Poti nos poços OGX-101 e OGX-93. Este último poço foi o único com todas as oito eletrofacies identificadas e é o único também que não apresenta a feição típica da presença de gás com o *crossover* entre densidade e neutrão, portanto, possivelmente trata-se de um reservatório seco.

As eletrofacies PT-4, PT-5, PT-6 e PT-7 são as melhores facies, indicando prováveis reservatórios, justificado pelo *crossover* densidade e neutrão. As facies de sedimentos mais finos (níveis de folhelho e/ou silte), identificadas nos poços OGX-49, OGX-101 e OGX-93 é a facies PT-3 e foi caracterizada como não reservatório.

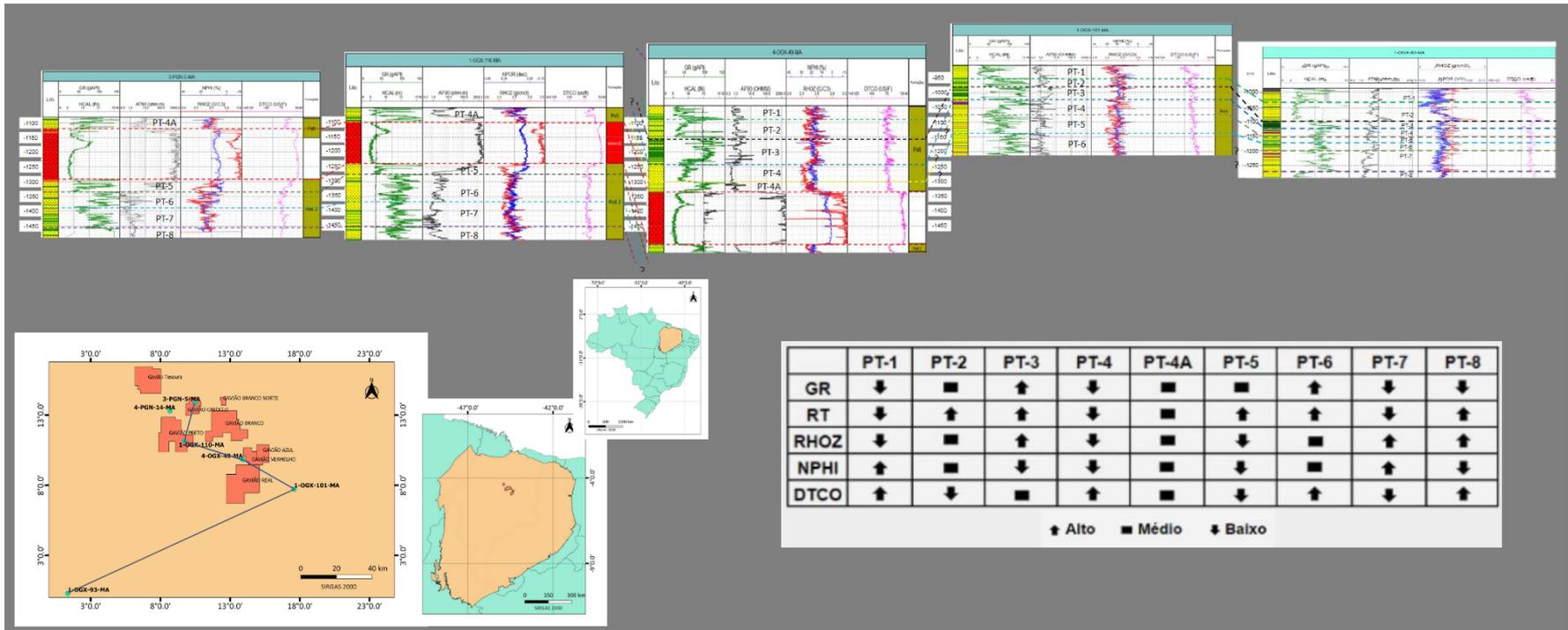


Figura 10: Identificação de eletrofácies e correção da Formação Poti. Tabela de características de cada eletrofácies identificada e mapa de correlação (Adaptado de Souza et. al., 2022).

5 MATERIAIS

5.1 Amostras de Calha

Os referentes dados deste trabalho foram adquiridos a partir de amostras de calha de poços no intervalo de interesse. Estas são fragmentos de rocha resultante da ação de corte efetuado pela broca sobre as formações rochosas durante a perfuração, sendo transportadas do fundo do poço até a superfície pelo fluido de perfuração (via Dicionário do Petróleo). Uma quantidade representativa das amostras é coletada a partir dos fragmentos acumulados na extremidade das peneiras de lama, as quais, após sua chegada, são separadas, lavadas para remoção do fluido de perfuração e peneiradas, (Figura 11). O material coletado é armazenado em sacos de pano (Figura 12), previamente identificados com os prefixos do poço e a profundidade da amostra.

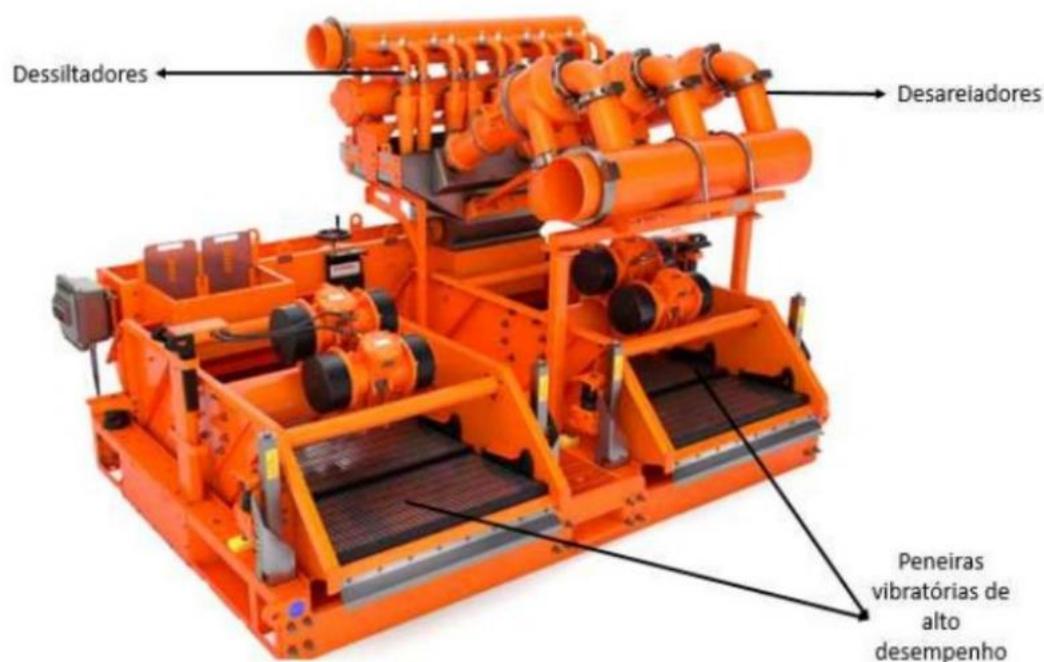


Figura 11: Exemplo de peneira vibratória utilizada em sonda para amostragem de rocha e filtragem de cascalho (Modificado de Swaco, 2013 apud Fagundes et al., 2018)



Figura 12: Representação da disposição das amostras de calha na caixa (1) e exemplificação da numeração de cada amostra correspondente à profundidade de perfuração (2). Fonte: Do autor.

Um dos problemas encontrados no processo de lavagem das amostras de calha é que, no caso de amostras argilosas em excesso, a estimativa da percentagem da argila pode ser prejudicada, subestimando-a (Dicionário do Petróleo; Nobre *et al.*, 2019). As amostras de calha são recursos que a maioria dos poços perfurados produz. A proposta aqui foi realizar um estudo integrado de rocha-perfil com o apoio do perfil composto de cada poço em questão com as análises gamaespectrais realizadas nas amostras de calha no intervalo estudado.

Em regiões de interesse exploratório a coleta do material é feita de 3 em 3 metros (a cada 3 metros de rocha de perfurada faz-se uma amostragem na peneira). Com isso, é válido ressaltar que os valores colhidos na análise de uma amostra individual representam a média de informações de um intervalo equivalente a três metros. É usual que as amostras de calha representem a extensão superior dos sedimentos, ou seja, uma amostragem feita em 3 metros de profundidade é o representativo da rocha de 0 a 3 metros na subsuperfície. Esse tipo de amostragem de três metros é comum nos intervalos que contêm as rochas geradoras ou reservatórios, o intervalo de interesse desse trabalho. Ressalta-se ainda que a amostragem, em intervalo de

baixo interesse exploratório, pode ser em intervalos de 9 a 15 metros (como nas fases iniciais de perfuração).

5.2 Equipamento Gamaespectrômetro

Neste trabalho foram utilizados dois gamaespectrômetros portáteis: um equipamento mais antigo, que será chamado de A e um mais novo, B (adquirido pela Universidade no ano de 2021). Dos cinco poços deste trabalho, quatro deles tiveram seus dados adquiridos com o equipamento A e apenas um com o B, o poço 4-OGX-49-MA.

Não existe discrepância aparente nos dados oriundos dos equipamentos A e B a partir da comparação da medição da amostra padrão 30 vezes consecutivas. Optou-se pela substituição por questões operacionais e justificou-se com a comparação estatística dos dados gerados por ambos equipamentos (Figura 14). O equipamento está ilustrado na Figura 13.



Figura 13: Gamaespectrômetro RS-230 - RadiationSolutions (Nobre, 2019)

Medidas Equipamento A				
	DR	K	U	Th
Média:	144,710	2,497	3,777	34,003
Desv.Pad	5,792	0,169	0,737	2,100
Desv.Med	4,578	0,137	0,586	1,710

Medidas Equipamento B				
	DR	K	U	Th
Média:	155,793	2,540	4,397	36,647
Desv.Pad	5,981	0,169	0,975	2,718
Desv.Med	5,106	0,135	0,731	2,170

Figura 14: Estatística comparativa entre equipamentos A e B (Fonte: Do Autor)

Na Figura 14 DR corresponde a “Dose de Radiação” que neste trabalho é referenciado como Total Gama. Além disso, os valores presentes na figura

representam média e desvios dos dados extraídos dos diferentes equipamentos. Sendo o desvio padrão o erro associado entre os dados medidos e o desvio da média o erro de cada valor relativo à média daquele grupo de dados. O teste de calibração foi realizado utilizando a amostra padrão rica em tório (Figura 15). Além disso, todas as comparações estatísticas entre equipamentos A e B foram a partir da aquisição com a amostra padrão.



Figura 15: Amostra padrão de areia monazítica (Nobre, 2019).

É possível perceber que as médias dos dados vindo do equipamento novo são ligeiramente mais baixas em comparação ao outro equipamento. Para melhor compreensão dessas diferenças utilizou-se destes dados para avaliação visual em gráficos comparando os valores adquiridos nos dois equipamentos pelo número de análises feitas (Figura 16).

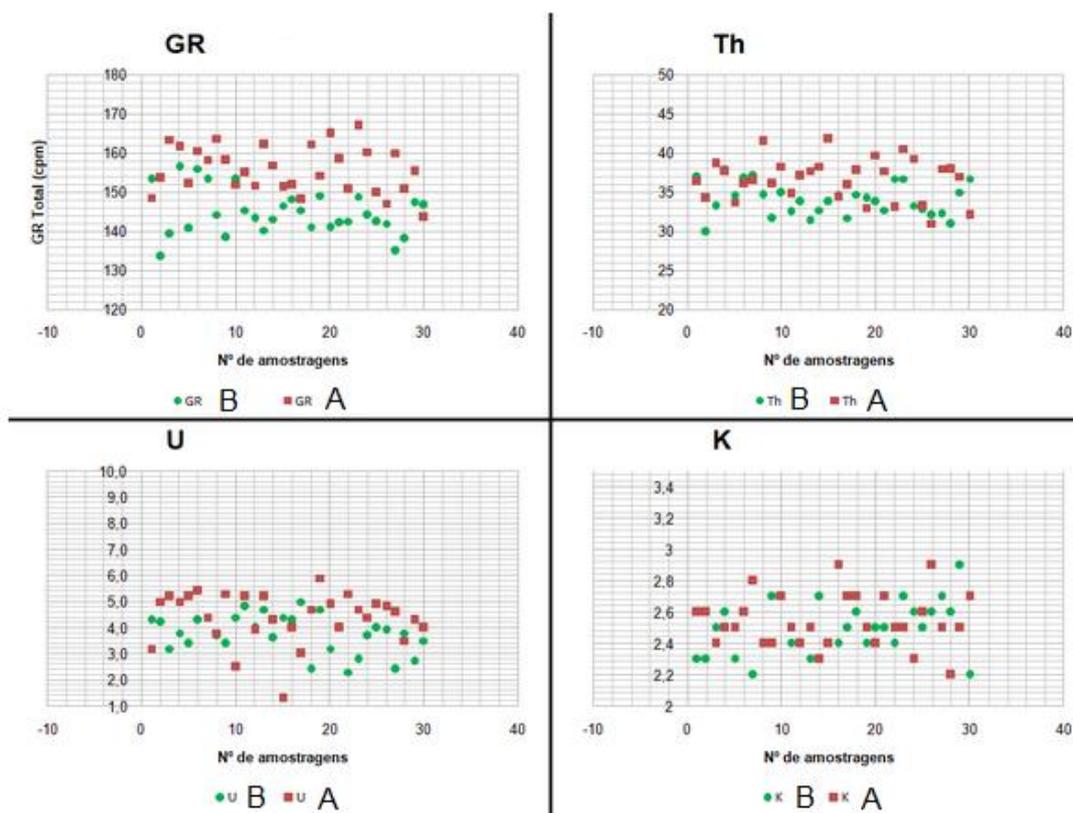


Figura 16: Crossplots dos dados output dos dois equipamentos em mesmos gráficos para efeito de comparação (Fonte: Do autor)

Pode-se perceber que para o potássio não há diferença considerável na nuvem de dados, ou seja, para os dois aparelhos não existe diferença entre os resultados. Com o urânio a diferença já aparece mais evidente mesmo que os dados estejam em um *range* de valores similar; interessante pontuar que existem alguns pontos espúrios que desviam da média. Quando se observa a dispersão do tório vê-se que os dados a partir do equipamento novo estão em um patamar mais baixo de valores. Os valores do *crossplot* do Total Gama também apresentam certa variação entre os valores vindos dos diferentes aparelhos, sendo os valores mais baixos adquiridos com o equipamento novo.

O que se observa com o conjunto de dados e análises até aqui é uma pequena disparidade entre os dois equipamentos, onde utilizando o equipamento novo os valores, no geral, são mais baixos quando comparado com as medições realizadas com o equipamento antigo. Tendo conhecimento deste fato, algumas

precauções podem ser tomadas, como analisar um conjunto de dados ou amostras que tenham sido adquiridos apenas com um dos equipamentos ou ter o entendimento que possivelmente os dados de tório e Total Gama serão superestimados com o equipamento A.

6 MÉTODOS

Nesta seção do trabalho, será tratada a metodologia empregada e desenvolvida para a utilização dos dados gamaespectrais obtidos em amostras de calha. Ademais, é importante comentar que os estudos apresentados aqui fazem parte de um grupo de trabalho em contexto de projeto de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em parceria entre a Petrobras e a Universidade Federal Fluminense (UFF).

O projeto Parnaíba (nome informal dado ao grupo de pesquisa na UFF) contou e conta com diversos seguimentos utilizando as amostras de calha (Figura 17).

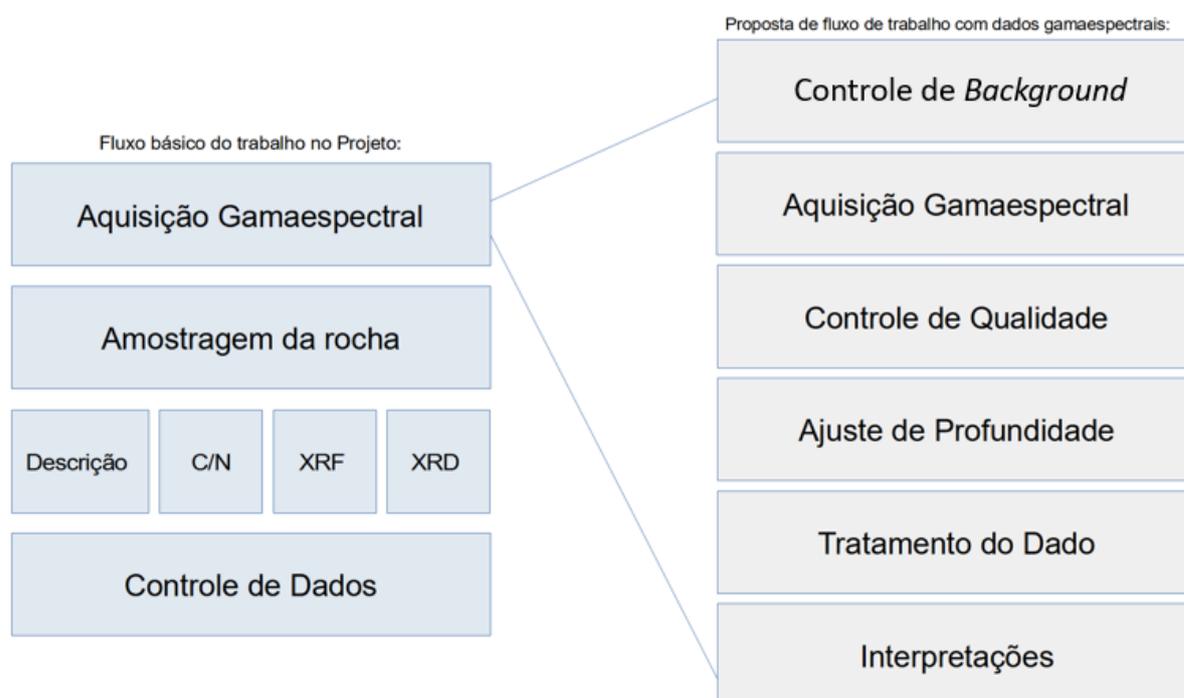


Figura 17: Fluxo básico de trabalho no grupo de projeto e proposta de fluxo de trabalho para os dados gamaespectrais (Fonte: Do Autor)

O fluxo básico de trabalho geral do grupo não será comentado neste trabalho. O objetivo de tê-lo aqui é mostrar que o trabalho realizado com os dados gamaespectrais é a primeira fase a ser iniciada com as amostras de calha, visto que essa etapa é não destrutiva para as amostras.

O controle de *background* refere-se à escolha mais apropriada do local para a aquisição das medidas. Já Aquisição e o Controle de qualidade referem-se ao uso de dois diferentes equipamentos. Em seguida, o ajuste de profundidade, ao tratamento de dados relativo à filtragem empregada no dado e, por fim, às interpretações realizadas no dado já tratado.

6.1 Aquisição de Dados

Neste trabalho, todos os dados foram adquiridos através do gamaespectrômetro portátil *Radiation Solutions Inc RS-230 BGO Super-SPEC Handheld Gamma-Ray Spectrometer* (Figura 18) no modo *Assay* e com o tempo de aquisições de 60 segundos por amostra. Nobre *et al.* (2019) mostram que o emprego desse tempo de análise proporciona resultados satisfatórios para este tipo de estudo. A contagem total de radiação é obtida através de um espectrômetro, pela medida de todos os raios gama dentro da janela energética de 0,41-2,81 MeV. Cada elemento tem sua janela de energia associada, sendo que os raios gama do potássio (^{40}K) se concentram no pico de energia de 1,46 MeV e, como os isótopos ^{238}U e ^{232}Th não emitem a radiação gama, são usados seus subprodutos de decaimento radioativo, ^{214}Bi e ^{208}Tl , respectivamente, compreendidos na faixa de 1,76 e 2,61 MeV (Adaptado de Processamento e interpretação de dados magnetométrico, gravimétricos e radiométricos apostila teórica de gamaespectrometria).

Tendo em vista que as rochas emitem naturalmente radiação gama (GR) é possível aferir o funcionamento passivo do equipamento em questão e como isso ocorre. A informação fornecida pelo aparelho são informações elétricas que são geradas por meio da interação da energia gama emitida com os elétrons dos átomos presentes no cristal detector BGO de germanato de bismuto (^4Bi ^3Ge ^{12}O). Essa interação se dá principalmente pelo efeito *Compton*. Após cada colisão, os raios gama defletidos continuam a sofrer choques sucessivos até serem absorvidos

fotoeletricamente, quando então ocorre a expulsão de elétrons dos respectivos átomos absorvedores, dando origem a correntes elétricas, finitas e possíveis de serem medidas (NERY, 1990).



Figura 18: Ambiente de trabalho de aquisição de dados; equipamento e amostra dentro da malha de chumbo (Fonte: Do autor).

A aquisição dos dados gamaespectrais a partir das amostras de calha foi feita em ambiente com *background* conhecido, tentando minimizar efeitos externos. Além disso, as medições foram realizadas dentro de uma calha de chumbo para que dessa forma a radiação natural do ambiente externo não tivesse interferência significativa. Todos os valores medidos, incluindo profundidades das amostras de calha no poço, foram armazenados em uma planilha. Estando em formato adequado, os dados de profundidades, Total Gama, K (%), U (ppm) e Th (ppm) foram importados para o *software* Trace K2, onde as devidas interpretações foram feitas.

6.2 Tratamento de Dados

Este trabalho teve algumas etapas para o tratamento de dados como os ajustes de profundidades. Aqui o objetivo será apresentar a filtragem realizada no dado espectral para melhor visualização das tendências de crescimento e diminuição.

Miranda 2014 *apud* Cumella e Scheevel (2008) propõe uma filtragem que segundo eles tem o intuito de distinguir eventos de alta e de baixa frequência. O segundo passo consistiu na aplicação de um filtro gaussiano no dado de raios gama, com janelas de 5m, 10m e 20m (Figura 19).

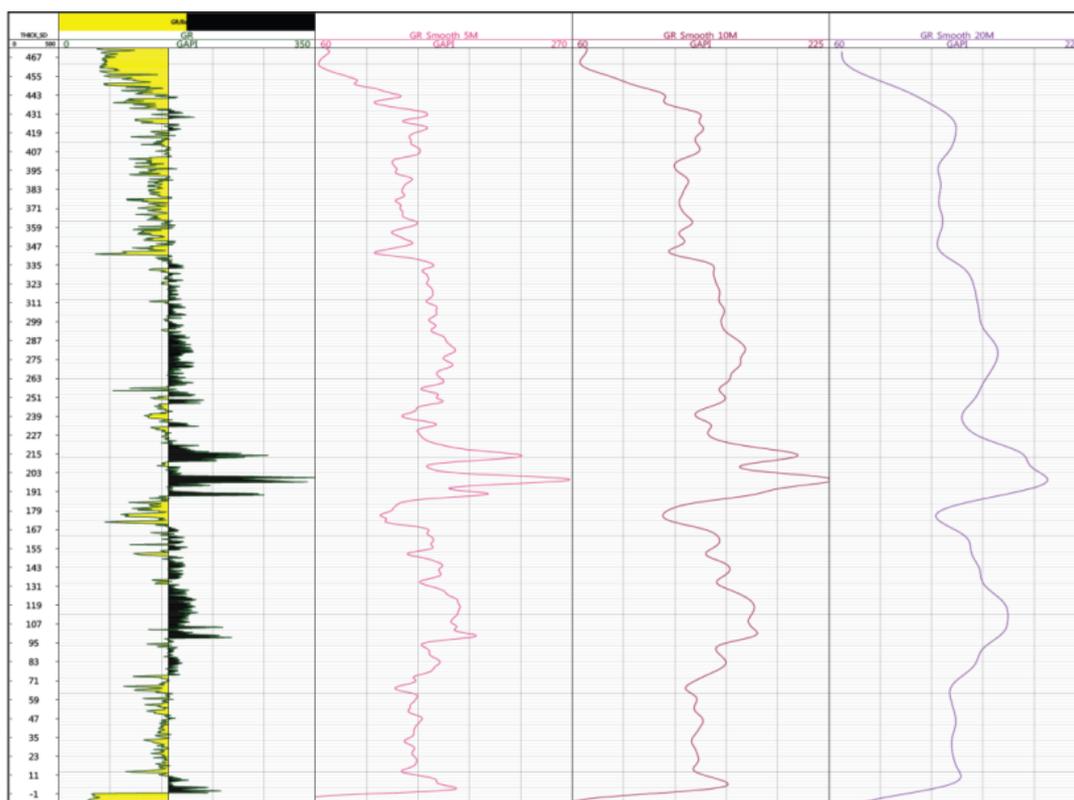


Figura 19: Comparação do perfil de raios-gama adquirido no intervalo em estudo, após remoção das soleiras de diabásio, suavizado com filtro gaussiano, aplicando diferentes janelas (Miranda 2014)

Como mostrado por Saraiva et. al. (2022), os dados gamaespectrais adquiridos em amostras de calha apresentam alta frequência, o que por vezes torna a interpretação de tendências mais difícil. Esses autores propõe uma filtragem para o dado gamaespectral de laboratório, que pode ser visualizado na figura 20.

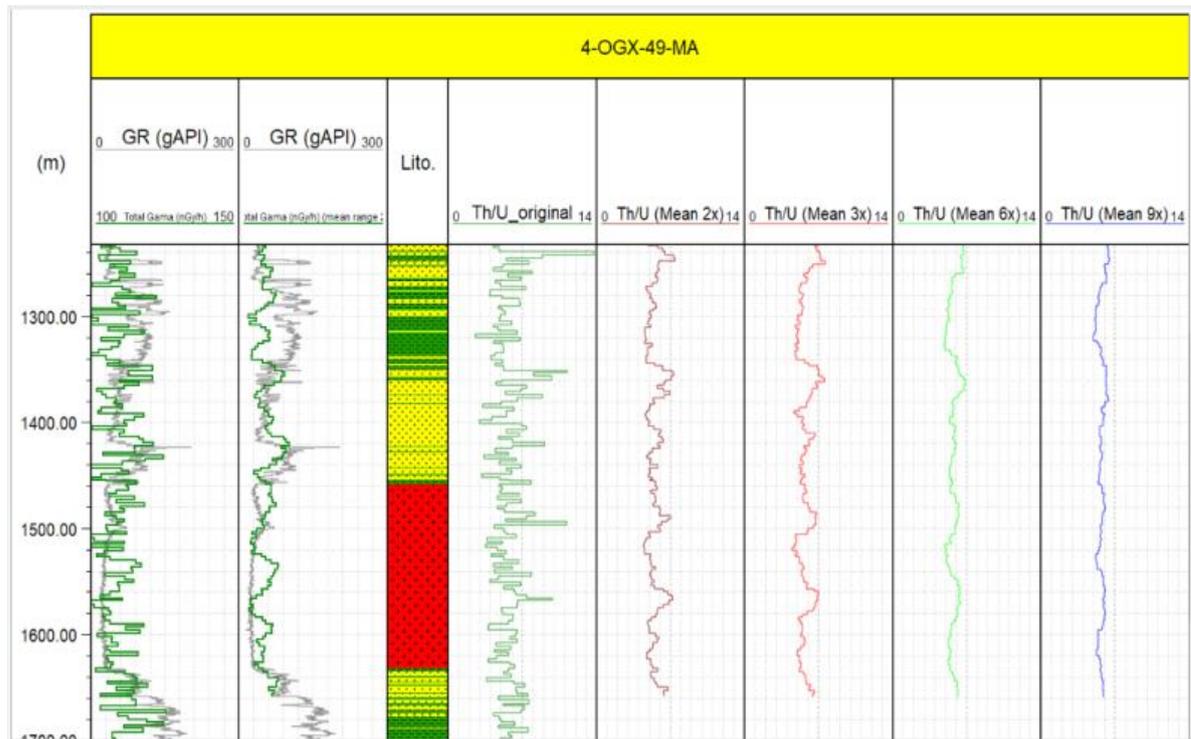


Figura 20: Comparação entre os diferentes filtros calculados e exemplificação utilizando a curva de razão Th/U (Fonte: Do Autor)

Uma série de testes foi realizada para escolher o melhor filtro (vide figura 20). O cálculo estatístico utilizado pode ser observado a seguir:

$$Filtro = (A_n + A_{(n-1)} + A_{(n-2)} + A_{(n+1)} + A_{(n+2)}) / 5$$

Onde:

Filtro = Dado filtrado;

A = Valor da amostra;

n = Índice de profundidade intervalar de 3 metros;

n - x = Profundidade anterior;

n + x = Profundidade posterior.

A partir da comparação dos filtros usados, o filtro de range 2 foi escolhido para ser aplicado no trabalho final. É possível observar que, quanto maior o range da média, feita nos dados, mais suavizada fica a curva, o que traz prejuízo às interpretações. O filtro de range mais baixo foi escolhido pelo motivo de proporcionar uma suavização boa o suficiente para o dado, como também não mascarar o dado original. Por exemplo, podemos ver no quinto track da Figura 20, na profundidade

aproximada de 1.360 metros, uma diminuição da razão Th/U dentro de um intervalo crescente. Essa informação se perde nos respectivos ranges maiores (Saraiva *et al.*, 2022).

Além disso, foram analisados *crossplots* entre o dado de GR (*wireline*) e o Total Gama original, além de outro contra o Total Gama filtrado. Na Figura 21 é notável o aumento da correção entre os dados *wireline* e de laboratório após aplicação do filtro. Ainda que a correlação dos dados continue baixa, deve-se lembrar que as interpretações neste trabalho são realizadas de maneira qualitativa e que o ganho no uso do filtro foi o aumento da correlação em cinco vezes em relação a correlação do dado sem filtragem. Além disso, há uma forte influência das diferenças entre as profundidades dos dados de perfil a poço aberto (*wireline*) e as profundidades das amostras de calha, devido ao tempo de retorno, conforme descrito a seguir. Essa correlação tende a aumentar com um ajuste dessas

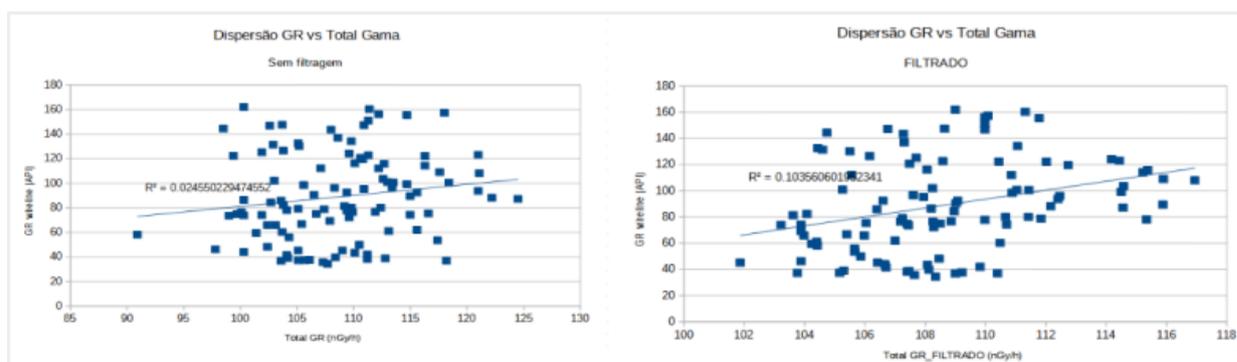


Figura 21: Crossplots realizados para comparação da correlação dos dados gamaespectrais de laboratório antes e após aplicação do filtro de suavização (Fonte: Do Autor).

profundidades.

É possível perceber o aumento da correlação entre as curvas de GR *wireline* e GR de laboratório pelo ganho no fator R^2 , que sobe de 0.02 para 0.10.

6.3 Ajuste de Profundidades

Segundo o manual de subsuperfície da IBP de 1984, chama-se tempo de retorno o período decorrido para que os fragmentos cortados pela broca no fundo do poço sejam carregados pela lama, através do espaço anular, até as peneiras de lama na superfície. Este fator ainda depende de outras variáveis como: profundidade do poço, volume do espaço anular, vazão de bombeamento e características do

cascalho. O cálculo do tempo de retorno dificilmente fornecerá valores exatos, visto que muitos dos parâmetros utilizados são apenas estimados e não exatos.

Podemos definir uma equação para o tempo de retorno (Petrobras, DEPEX. 1984; Whittaker, 1987; Dunn, 1993; Dria, 2007) como:

$$t_{lag} = \frac{D_{lag}}{v_t}, \text{ onde: } D_{lag} = D_{bit} - t_{lag} * R_p.$$

t_{lag} = Tempo de retorno em minutos;

D_{lag} = Profundidade em metros;

v_t = Velocidade de retorno em metros por minuto;

D_{bit} = Profundidade da broca;

R_p = Taxa de penetração.

A figura 22 ajuda na visualização da disposição dos componentes do cálculo do tempo de retorno e do ambiente do poço.

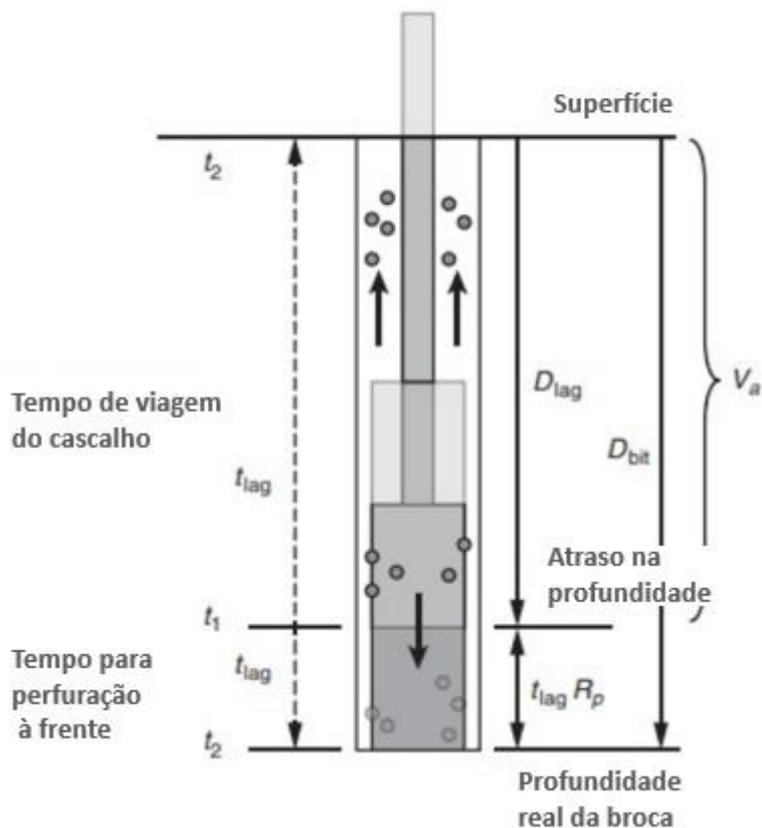


Figura 22: Esquema representativo da relação entre as amostras de calha e o tempo de retorno delas (Naganawa, 2020).

Os parâmetros de velocidade de perfuração são muito importantes e podem variar dados muito variáveis ao longo da perfuração de um poço por conta de diferentes litologias, amostragens, tiragem de testemunhos e troca de broca, por exemplo. Essa velocidade pode ser ainda mais variável em poços direcionais ou horizontais (Naganawa, 2020).

Além do tempo de retorno, outros fatores também podem influenciar o desajuste de profundidades das amostras de calha (Garcia-Hernandez, 2007). Os autores mostram que a rotação da coluna de perfuração afeta mais a velocidade de retorno das amostras de calha do que a inclinação do poço ou o tipo de fluido de perfuração. Com isso, é cabível constatar que poços verticais também podem apresentar erros nas tomadas de profundidades das amostras de calha.

Outro fator fundamental que deve ser levado em consideração é que a coleta das amostras é feita de maneira manual e pode ter erros e/ou descasos associados. Pode haver negligências por parte do encarregado da coleta, efetuando a amostragem poucas vezes durante o seu turno, mas rotulando as amostras como se

coletadas nas profundidades determinadas (Petrobras, DEPEX. IBP, 1984). Antes das interpretações dos dados gamaespectrais um ajuste de profundidade foi realizado nos dados. Em análise prévia dos dados espectrais foi percebido um descompasso no padrão nas curvas de Raios Gama corrido em poço aberto e a curva Total Radiação adquirida a partir das amostradas de calha. Para ilustrar essa situação um exemplo é mostrado na figura 23.

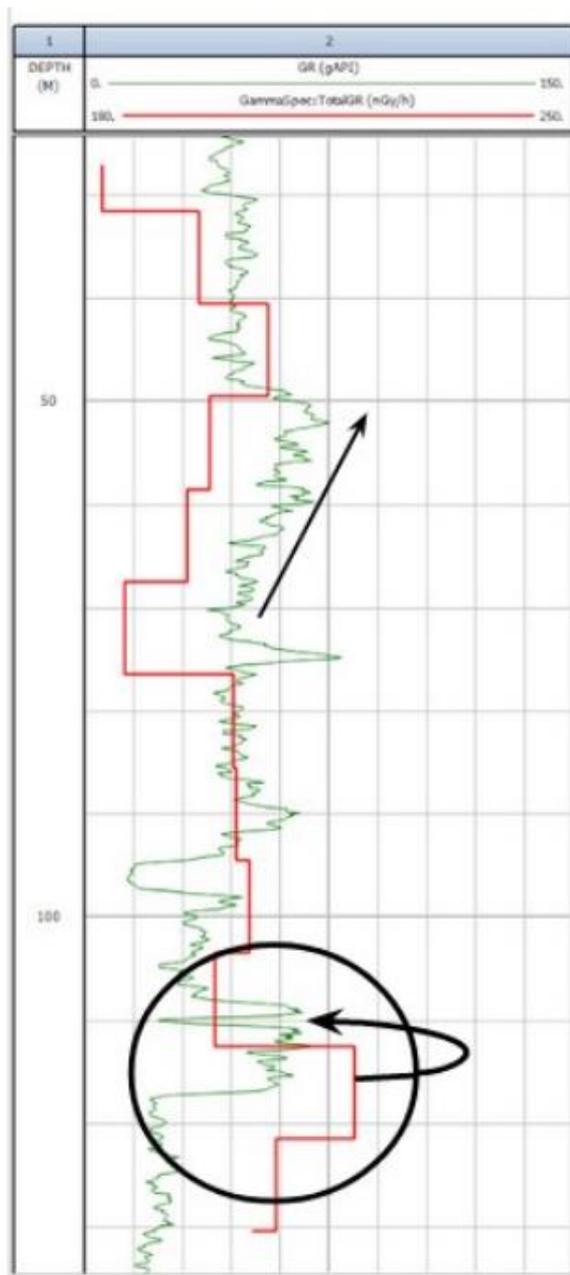


Figura 23: Curva verde GR corrido em poço aberto (poço 1-OGX-93-MA); Curva vermelha Total Gama de laboratório. Evidenciado o descompasso entre as curvas (Fonte: Acervo pessoal Jeniffer Nobre).

Depois de alguns testes uma aplicação foi desenvolvida para solucionar esse problema de desajuste entre as curvas, o Core-fit2 (*software* desenvolvido pelo pesquisador Rodrigo Mota), que inicialmente foi desenvolvido para ajustes de dados de testemunhos. Nele é possível a importação das curvas de interesse e o ajuste vertical dos dados de tendo como base a curva de raios gama do poço (Figura 24).



Figura 24: Curva verde GR corrido em poço aberto; Pontos Total Gama de laboratório. Ambiente do Software de ajuste de profundidade (Fonte: Do autor)

A figura 24 apresenta certo intervalo de outro poço de interesse deste trabalho, o 4-OGX-49-MA. Os dados pontuais foram movidos em profundidade (y) e um documento de correspondência das profundidades foi gerado. A tabela 1 mostra essa correspondência e sua importância será mais bem discutida na próxima etapa deste documento.

A maior parte dos pontos foi ajustado para cima (em direção da superfície). O máximo deslocamento para cima (sentido cabeça do poço) foi de 2.08 metros, enquanto que para baixo (sentido fundo do poço) foi de 1.13 metro para baixo. Muitos dos intervalos, nos quais houve ajuste de profundidade coincidem com intervalos de arenito e onde a ferramenta *caliper* mostra “arrombamento”.

Tabela 1: Exemplificação do resultado dos ajustes de profundidades realizados (Fonte: Do autor).

Depth (m)	Corrected Depth (m)
1071	1071,00
1074	1074,31
1077	1077,00
1080	1079,69
1083	1083,00
1086	1085,54
1089	1089,00
1092	1092,00
1095	1095,00
1098	1097,69
1101	1101,92
1104	1104,00
1107	1105,93
1110	1110,00
1113	1113,00
1116	1116,00
1119	1118,78
1122	1122,00
1125	1125,00
1128	1128,00
1131	1129,76
1134	1134,00
1137	1136,62
1140	1140,00
1143	1143,38
1146	1146,00
1149	1149,32

7 RESULTADOS

Neste trabalho são abordados cinco poços, sendo eles: 1-OGX-93-MA, 1-OGX-101-MA, 1-OGX-110, 3-PGN-5-MA e 4-OGX-49-MA. Somente este último passou pelo fluxo completo de trabalho proposto aqui. Os outros quatro poços não tiveram aquisição realizada como descrito neste texto e por isso apresentam certa variância nos dados apresentados. No entanto, as avaliações realizadas são

qualitativas e a caracterização de cada um foi feita por meio da observação de tendências nos dados. Importante reiterar que todos os cinco poços passaram pelas etapas de análise de dados e interpretação.

A seguir é mostrado o resultado da etapa de análise de dados com tabelas contendo valores máximos, mínimos, média, moda e desvio padrão (Tabela 2).

Tabela 2: Dados estatísticos do poço OGX-49 antes e depois do tratamento de dados.

	Estatística OGX- 49 Fm. Poti							
	Total Gama (nGy/h)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Máximo	124.50	116.94	3.00	2.82	6.20	4.38	26.30	23.26
Mínimo	90.90	101.86	2.10	2.38	1.90	2.80	15.00	18.30
Média	108.62	108.65	2.55	2.56	3.71	3.70	20.45	20.45
Moda	100.30	109.98	2.60	2.54	3.40	3.62	20.30	20.84
Desv. Pad.	5.75	3.12	0.17	0.08	0.78	0.33	1.98	1.04

É possível observar que, no poço 4-OGX-49-MA, após o tratamento de dados, todos os valores têm uma queda e os mínimos aumentam. Isso apenas corrobora com o esperado já que o filtro utilizado justamente tende a excluir valores que se distanciam muito da média. As médias permanecem praticamente intactas o que mostra que o comportamento da curva não deve sofrer alteração após o tratamento de dados. A moda é alterada de maneira suave o que também era esperado, pois os valores do dado após tratamento são alterados. E por fim ter uma diminuição nos valores de desvio padrão mostra que o objetivo do filtro foi alcançado pois temos um dado mais suave que se distancia pouco da sua média, podendo apresentar tendências de aumento e diminuição mais claras (Figura 25). A suavização proposta possibilita uma melhor visualização das tendências nas curvas.

No poço 3-PGN-5-MA é possível perceber que existe um distanciamento maior entre as médias dos valores antes e depois do tratamento de dados (tabela 3). Além disso, é perceptível o grande desvio padrão, principalmente para os valores de Total Gama e Tório (Figura 26). Neste poço existe um intervalo onde foi retirado um testemunho, não havendo coleta de amostras de calha neste intervalo. A partir deste poço as escalas de unidades estão um pouco diferentes para o Total Gama, urânio e

tório. O comportamento da curva de potássio se mantém em todos os poços, mesmo com diferentes metodologias.

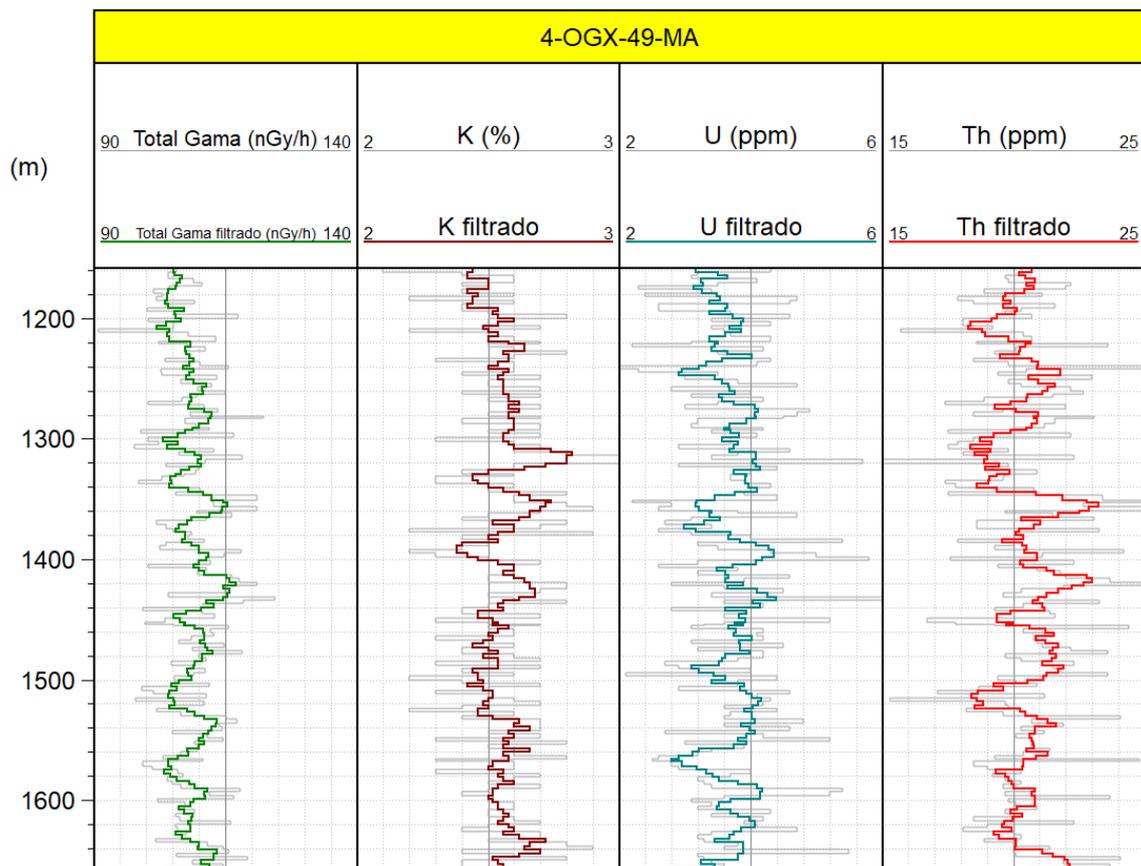


Figura 25: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-49. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.

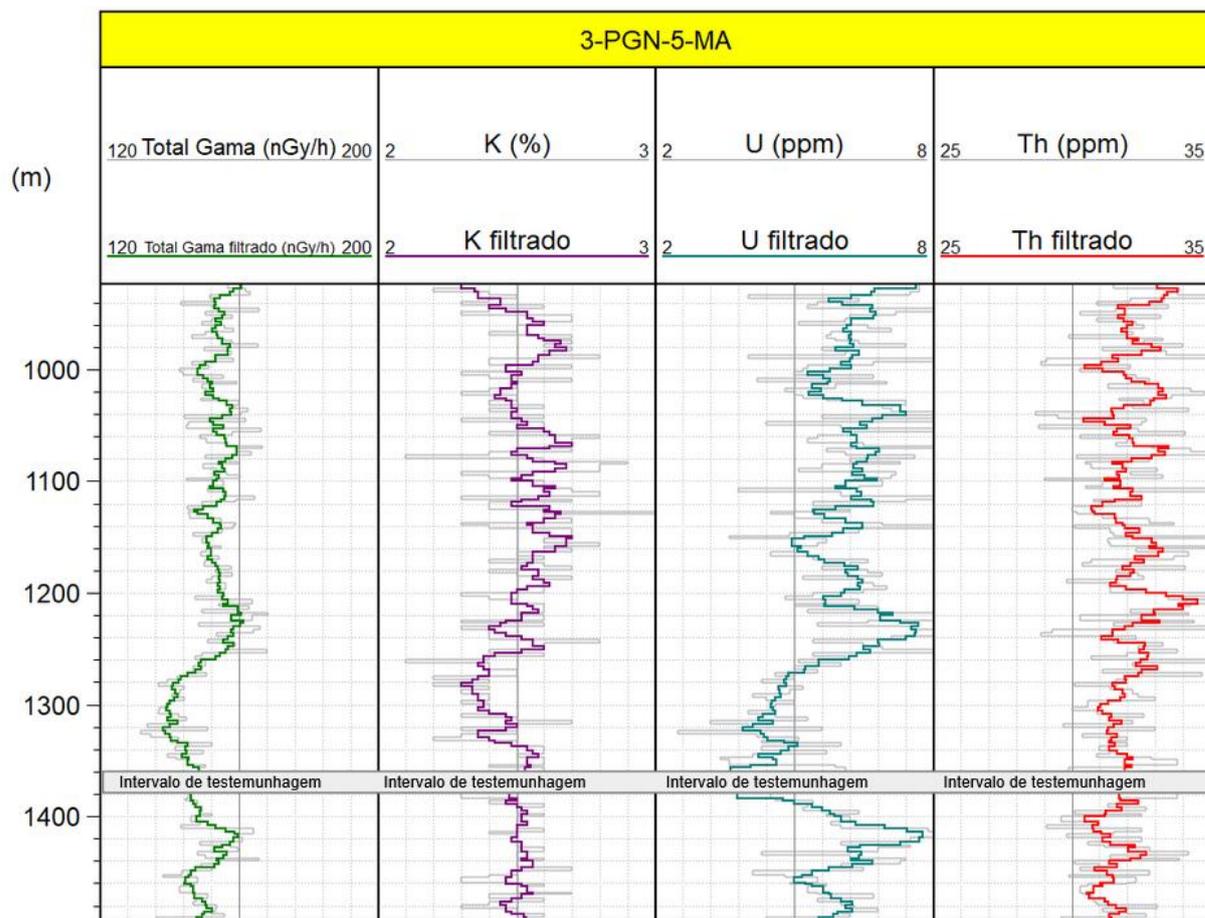


Figura 26: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço PGN-5. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.

Tabela 3: Dados estatísticos do poço PGN-5 antes e depois do tratamento de dados.

	Estatística PGN- 5 Fm. Poti							
	Total Gama (nGy/h)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Máximo	165.80	159.64	2.70	2.58	8.90	7.78	34.20	32.70
Mínimo	136.10	95.60	2.20	1.52	3.40	2.97	29.10	19.17
Média	149.17	146.09	2.51	2.46	5.76	5.65	31.47	30.72
Moda	145.70	-	2.50	2.52	6.00	5.38	32.00	31.12
Desv. Pad.	19.88	14.97	0.37	0.27	1.37	1.05	4.67	3.40

No poço OGX-101 (figura 27) vê-se que os dados apresentam grande frequência principalmente no elemento potássio. Mesmo com os dados espectrais ainda com essa alta frequência foi decidido seguir desse modo para que todos os poços tenham o mesmo filtro aplicado. O interessante a se pontuar neste poço é que as médias de antes e depois se conservam até duas casas decimais. Pode-se perceber também a proximidade entre os máximos e mínimos referentes ao Total Gama e os baixos valores para desvios padrão para todos os dados (Tabela 4).

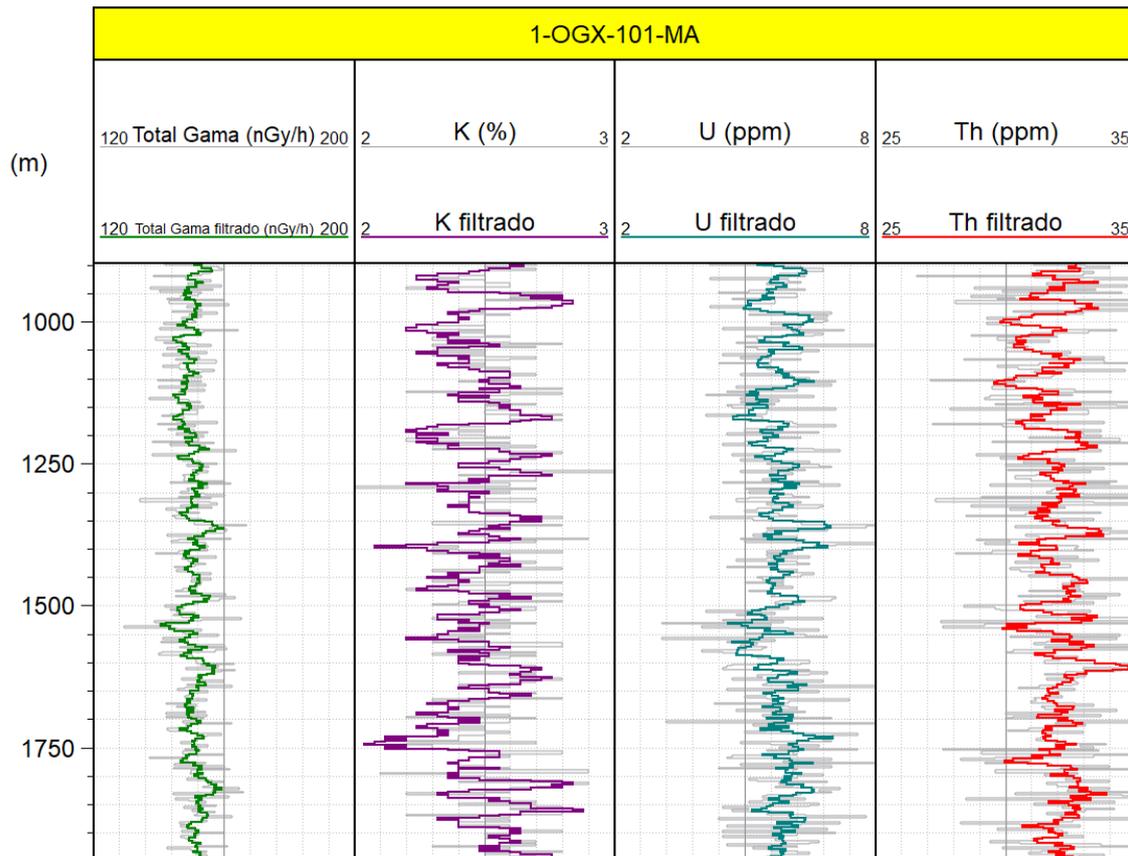


Figura 27: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-101. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.

Tabela 4: Dados estatísticos do poço OGX-101 antes e depois do tratamento de dados.

	Estatística OGX- 101 Fm. Poti							
	Total Gama (nGy/h)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Máximo	167.00	160.02	3.00	2.68	8.40	6.98	36.10	33.70
Mínimo	134.40	144.42	2.00	2.40	4.10	4.74	27.10	29.56
Média	149.78	149.86	2.54	2.54	5.72	5.72	31.72	31.74
Moda	147.50	147.18	2.60	2.52	5.60	5.86	31.30	31.44
Desv. Pad.	6.16	2.92	0.15	0.07	0.86	0.41	2.05	0.89

A tabela 4 mostra que, como esperado, os valores de máximos diminuem e os valores de mínimos aumentam. Esse comportamento é esperado visto que realizando a filtragem ocorre uma diminuição da frequência, ou seja, que os dados se dispersem menos da média. O que também pode ser visto na diminuição dos valores de desvio padrão. Na figura 28 é possível observar o resultado da filtragem realizada.

Tabela 5: Dados estatísticos do poço OGX-110 antes e depois do tratamento de dados.

	Estatística OGX- 110 Fm. Poti							
	Total Gama (nGy/h)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Máximo	164.50	158.72	3.00	2.74	8.30	6.80	36.90	34.54
Mínimo	132.40	143.06	2.30	2.44	3.10	4.60	24.60	28.52
Média	150.37	150.40	2.58	2.58	5.77	5.77	31.65	31.66
Moda	151.30	153.30	2.60	2.64	6.70	5.74	30.20	31.32
Desv. Pad.	6.41	3.29	0.14	0.06	0.94	0.52	2.34	1.14

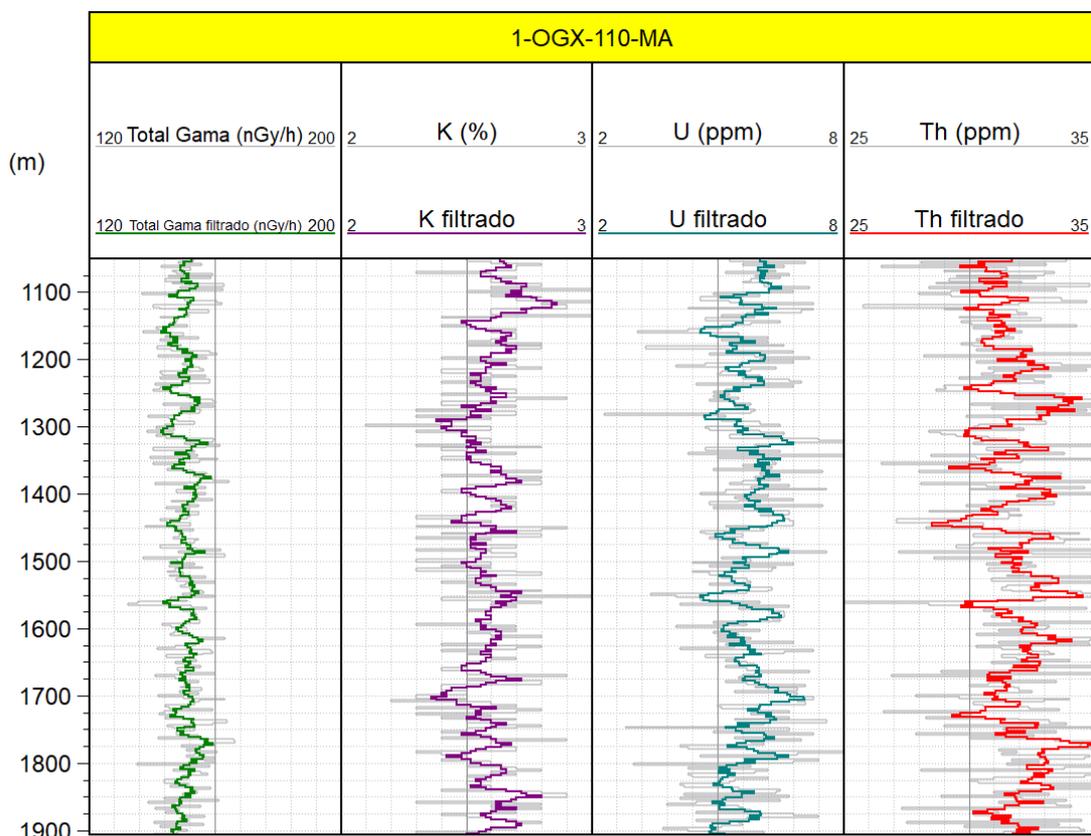


Figura 28: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-110. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.

Importante pontuar que o tratamento de dados foi feito em todo intervalo onde existiam dados como mostrado, por exemplo, na figura 29. Mas os dados estatísticos foram gerados apenas para o intervalo da Formação Poti, como exemplificado na tabela 6. É interessante frisar também que, em certos poços (OGX-49, OGX-110 e PGN-5), há a presença de uma soleira de diabásio na formação, e que os dados estatísticos também não levam em consideração esses intervalos.

As soleiras não foram caracterizadas neste trabalho, mas é importante saber da existência delas. Na tabela 7 foi realizada uma organização contendo informações sobre os intervalos da Formação Poti nos cinco poços estudados e a ocorrência das soleiras.

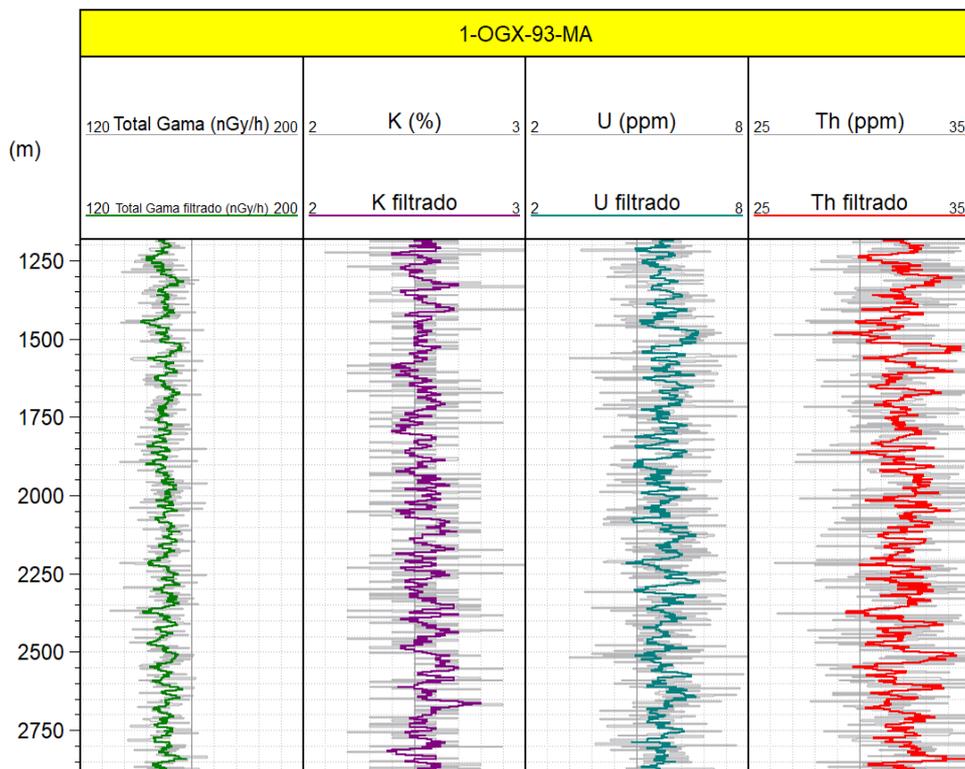


Figura 29: Comparação das curvas de total gama e os espectrais antes e após tratamento de dados do poço OGX-93. Curvas cinzas ao fundo representam o dado original de frequência maior. Os dados de título "filtrado" são mais suaves, sem perder a tendência do dado original.

Tabela 6: Dados estatísticos do poço OGX-93 antes e depois do tratamento de dados.

	Estatística OGX- 93 Fm. Poti							
	Total Gama (nGy/h)		K (%)		U (ppm)		Th (ppm)	
	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois	Antes	Depois
Máximo	164.40	157.18	3.00	2.70	8.00	6.66	36.30	34.18
Mínimo	134.50	141.90	2.10	2.40	3.50	4.98	26.20	28.84
Média	150.13	150.14	2.54	2.54	5.80	5.79	31.72	31.74
Moda	146.00	148.22	2.50	2.52	6.30	6.34	31.70	31.62
Desv. Pad.	6.19	2.84	0.15	0.06	0.87	0.41	2.18	1.03

Tabela 7: Intervalos da Formação Poti e ocorrência das soleiras nos poços.

Poços	Formação Poti	
	Intervalo de ocorrência	Soleira
1-OGX-93-MA	1207-1523 m	-
1-OGX-101-MA	1017-1369 m	-
1-OGX-110-MA	1129-1580 m	1182-1322 m
4-OGX-49-MA	1163-1659 m	1459-1633 m
3-PGN-5-MA	1122-1528 m	1175-1332 m

No anexo 1 é possível ver certa discrepância entre os dados estatísticos do poço OGX-49 e os demais. Essa discrepância não traz malefícios à interpretação e foi levantada a fim de conhecimento do método e dos resultados.

8 DISCUSSÕES

A partir da figura 30 os poços serão avaliados quanto aos dados gamaespectrais e sua correlação com os perfis geofísicos. O ajuste de profundidade realizado foi muito importante pois, sem isso, qualquer interpretação dos dados vindos das amostras de calha não teria acurácia vertical. A importância deste trabalho, além da contribuição com os dados gamaespectrais, é a justaposição das profundidades das amostras de calha. Esse ajuste será abrangido para todos os dados que tiverem origem nas amostras de calha dos intervalos estudados.

Com o ajuste de profundidade realizado e os dados plotados podemos observar boa correlação com os dados de litologia. As camadas de folhelhos e siltitos são bem identificados com as razões de Th/U e U/K. Isso ocorre quando a curva de U/K aumenta, ao passo que a curva de Th/U diminui, perceptível nas partes superiores das eletrofácies PT-4 e PT-2 da figura 30. Interessante perceber que essas camadas de sedimentos finos quase não são identificadas pela curva de GR corrido em poço aberto. Mesmo o conjunto de curvas Densidade/Neutrão não teve total sucesso nessa identificação.

Se tratando da superfície de inundação, podemos ver que neste ponto existe uma quebra de tendência em todas as curvas, tanto as curvas obtidas a poço aberto, quanto as curvas espectrais de laboratório. Além disso, podemos ver no perfil de litologia um intervalo contínuo de folhelho de aproximadamente 50 metros, aumento do valor do perfil de GR, falta de crossover nas curvas de Densidade/Neutrão. No último trilho, tem-se a razão Th/K que pode evidenciar aumento do teor de argilominerais como Ilita e Caulinita (Klaja & Dudek 2016). A diminuição dessa razão mostra tendências para um clima mais seco justamente no ponto da FS ocorre uma mudança na tendência dessa curva para um clima mais úmido, o que se corrobora com o aumento de camadas de sedimentos finos.

Ainda na figura 30 é possível visualizar as curvas espectrais com a aplicação do filtro de suavização além da marcação dos ciclos análogos de regressão e transgressão, que neste trabalho foram chamados de ciclos de aporte/afogamento. Estes ciclos foram utilizados para delimitar momentos de maior aporte continental (triângulos laranjas) e momentos de afogamento (triângulos azuis).

A suíte básica de perfis (HCAL, GR, AT, DTCO, RHOZ e NPOR) ainda foi empregada com o intuito de controle de qualidade para as interpretações e para o zoneamento dos reservatórios.

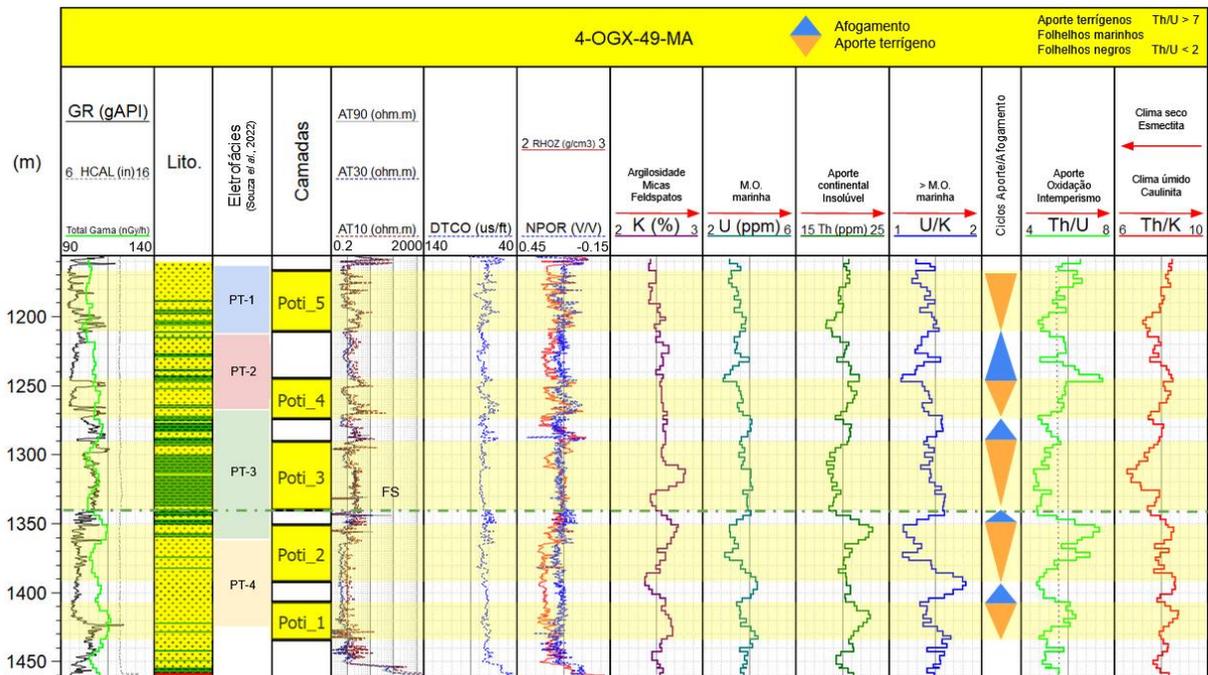


Figura 30: Interpretações paleoambientais e zoneamento da Fm. Poti no poço OGX-49, feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório, adquiridos a partir de amostras de calha; redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.

Com base nas razões de U/K (> matéria orgânica marinha) e de Th/U (aporte sedimentar terrígeno) ciclos de Karagodin foram marcados refletindo eventos de afogamentos e de aporte sedimentar. As eletrofácies também foram colocadas nessa imagem de interpretação e suas características podem ser revisitadas na figura 30. O que pode ser comentado brevemente é o fato de que a zona Poti_3, com maior conteúdo de folhelho, se correlaciona razoavelmente com facies PT-3 de não reservatório.

O intervalo **Poti_1** apresenta resistividade relativamente baixa, sônico por volta de 70, densidade e neutrão mostram um intervalo mais fechado na base e aberto no topo. Os espectrais de K e Th estão com uma tendência positiva enquanto o U negativa. Isso pode indicar um intervalo de aporte terrígeno que se confirma

visualizando as razões Th/U e U/K. Ainda podemos ver uma tendência positiva na razão Th/K indicando um possível ambiente mais úmido.

O intervalo **Poti_2** apresenta resistividade relativamente baixa (com aumento pontual no topo), sônico por volta de 70 (com diminuição para o topo), densidade e neutrão mostram um intervalo aberto de crossover. Os espectrais de K e Th estão com uma tendência positiva enquanto o U negativa. Isso pode indicar um intervalo de aporte terrígeno que se confirma visualizando as razões Th/U e U/K. É possível perceber também, na profundidade aproximada de 1365 m, um aumento local de urânio e evidenciado nas razões Th/U e U/K. Mudança de tendência observada nas curvas de resistividade, sônico e densidade/ neutrão. A tendência positiva na razão Th/K indicando um possível ambiente mais úmido ainda é preservada neste intervalo.

O intervalo **Poti_3** apresenta resistividade relativamente baixa (com aumento pontual no topo), sônico por volta de 70, densidade e neutrão mostram um intervalo fechado. Os espectrais de U e Th estão com uma tendência retilínea enquanto o K com um pico positivo local. A litologia reinterpretada mostra grande intervalo de folhelho, o que justifica o aumento da curva espectral de K e da curva de GR *wireline*. O mínimo global da razão Th/K é neste intervalo. Esse dado corrobora a bibliografia e leva a crer que este é o ponto de menor umidade naquele paleoambiente, provavelmente relacionado a um período glacial. Essa é uma das justificativas para marcação da superfície de inundação na base deste intervalo.

O intervalo **Poti_4** apresenta resistividade relativamente mais alta que os outros intervalos, sônico por volta de 60, densidade e neutrão mostram um intervalo fechado. Os espectrais se mostram bem-comportados sendo o U com leve tendência de queda e Th de alta. A razão Th/K infere um possível ambiente de clima mais úmido.

O intervalo **Poti_5** apresenta resistividade similar ao intervalo Poti_4, sônico por volta de 60, densidade e neutrão mostram um intervalo fechado. Os espectrais também se mostram bem-comportados sendo o U com leve tendência de queda e Th de alta. A razão Th/K infere um possível ambiente de clima mais úmido, correlato ao intervalo inferior.

O objetivo deste trabalho não foi realizar uma avaliação petrofísica quantitativa. No entanto, foi possível perceber que a Formação Poti, neste poço, apresenta alguns vários intervalos de reservatório intercalados com intervalos de folhelhos. A curva de resistividade mostra que, possivelmente, o reservatório é saturado com água. Também pode-se subdividir a formação em duas partes, sendo a inferior englobando os intervalos Poti_1 e Poti_2 e a parte superior com Poti_3, Poti_4 e Poti_5.

A Formação Poti Inferior apresenta características mais “limpas”, ou seja, menor quantidade de finos e maior abertura no *crossover* densidade/ neutrão. Acima da superfície de inundação marcada (FS), a Formação Poti Superior tem GR mais alto, com maior quantidade de finos e menor separação no *crossover* densidade/ neutrão.

Na figura 31 é mostrado e discutido os dados do poço PGN-5. Como na imagem anterior, será apresentado os perfis geofísicos de poço, dados gamaespectrais, litologia, ciclos interpretados, superfícies e eletrofácies.

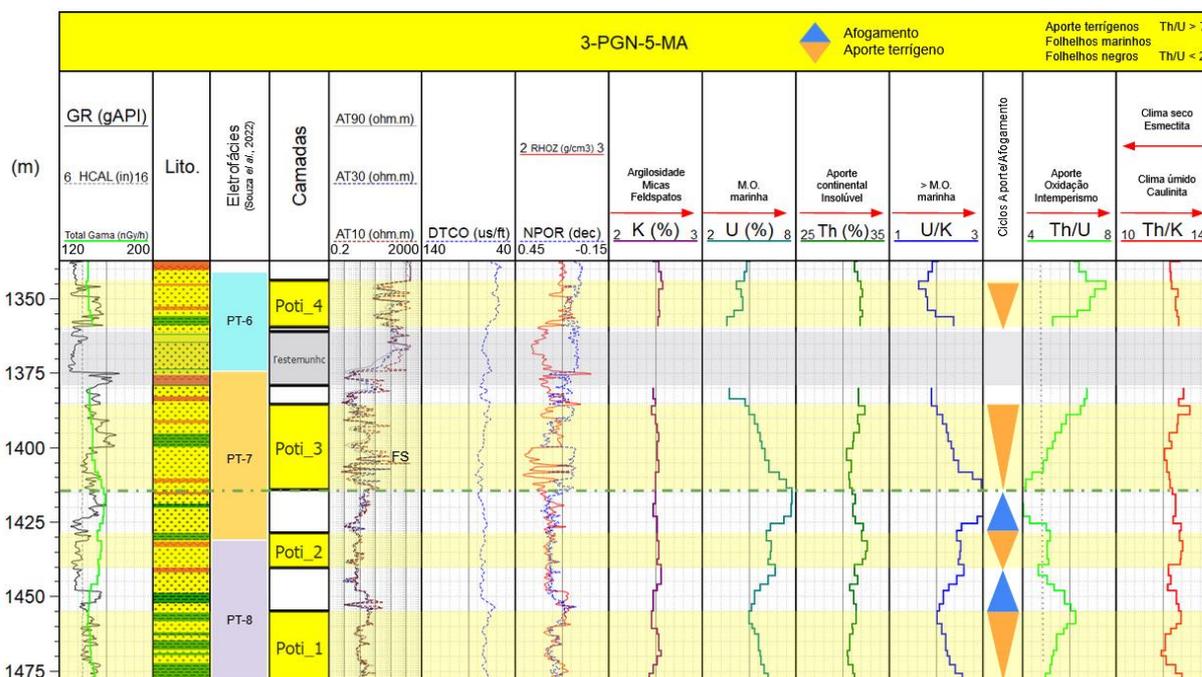


Figura 31: Interpretações paleoambientais do poço PGN-5 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescritção da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de docos.

Neste poço pode-se observar que as eletrofácies reconhecidas são as PT-8, PT-7 e PT-6, abaixo da intrusão magmática. De acordo com os perfis de GR, AT, RHOZ e NPOR os intervalos marcados como Poti_3 e o intervalo testemunhado são os melhores intervalos classificados como reservatório. O intervalo do testemunho não apresenta dados gamaespectrais pela falta de recuperação de amostras de calha. Para o intervalo do Poti_3 podemos ver que este coincide com um aporte terrígeno, similar ao intervalo do Poti_4.

No poço PGN-5 foram identificados 4 ciclos de aporte/afogamento com as proxies gamaespectrais e com o auxílio dos perfis geofísicos.

O intervalo **Poti_1** apresenta um GR decrescente da base para o topo, AT, DTCO com valores intermediários e o RHOZ/NPOR não apresenta *crossover*. O U apresenta uma tendência de diminuição para topo enquanto o K e Th não apresentam variações expressivas. A razão U/K mostra uma tendência de queda para o topo enquanto a razão Th/U aumenta para topo, indicando assim um aumento do aporte terrígeno. No final deste aporte é possível observar um aumento relativo para o topo, um ambiente de maior umidade.

O intervalo **Poti_2** sugere GR baixo e demais perfis geofísicos com valores medianos. O K não apresenta variação, U queda para o topo e Th com aumento gradual. Embora as razões U/K e Th/U se mostrem sem grande variação neste intervalo, a razão Th/K mostra tendência para um clima mais úmido e quente, o que concorda com um intervalo de aporte terrígeno.

O intervalo **Poti_3** inicia com a superfície de inundação (FS) marcada. A profundidade foi dada pelo fim do ciclo de afogamento marcado pelas razões de U/K e Th/U. Além disso, as mudanças significativas nos perfis de poço e o aumento nos valores da curva de GR. O GR desse poço apresenta valores relativamente mais altos que os ciclos anteriores com um pulso bem mais alto no meio do intervalo, causado provavelmente por um folhelho que, por sua vez, diminui a resistividade e retira o *crossover* do *track* de densidade/neutrão. Durante este intervalo a AT tem valores altos, mas diminuem gradativamente para o topo. O perfil de DTCO tem valores intermediários que diminuem para o topo. A proxy densidade/neutrão tem *crossover* bem marcado na base. O U mostra decréscimo acentuado para o topo e o contrário na curva de Th. As razões U/K e Th/U confirmam um ciclo de aporte terrígeno e a curva de Th/K indica um ambiente cada vez mais úmido para o topo. Não houve a marcação de um ciclo de afogamento pela falta de amostras de calha.

O intervalo **Poti_4** apresenta GR, DTCO e AT elevados. O densidade/neutrão não mostra *crossover* significativo. Apesar das curvas elementares não mostrarem muita variação, as suas razões identificam bem um intervalo de aporte terrígeno. Após este intervalo não foi marcado um intervalo de afogamento pois o perfil litológico mostra metasedimentos, o que significa já a ação da intrusão magmática.

Dando sequência ao estudo, na figura 32, será mostrado e discutido os resultados da interpretação dos dados do poço OGX-101.

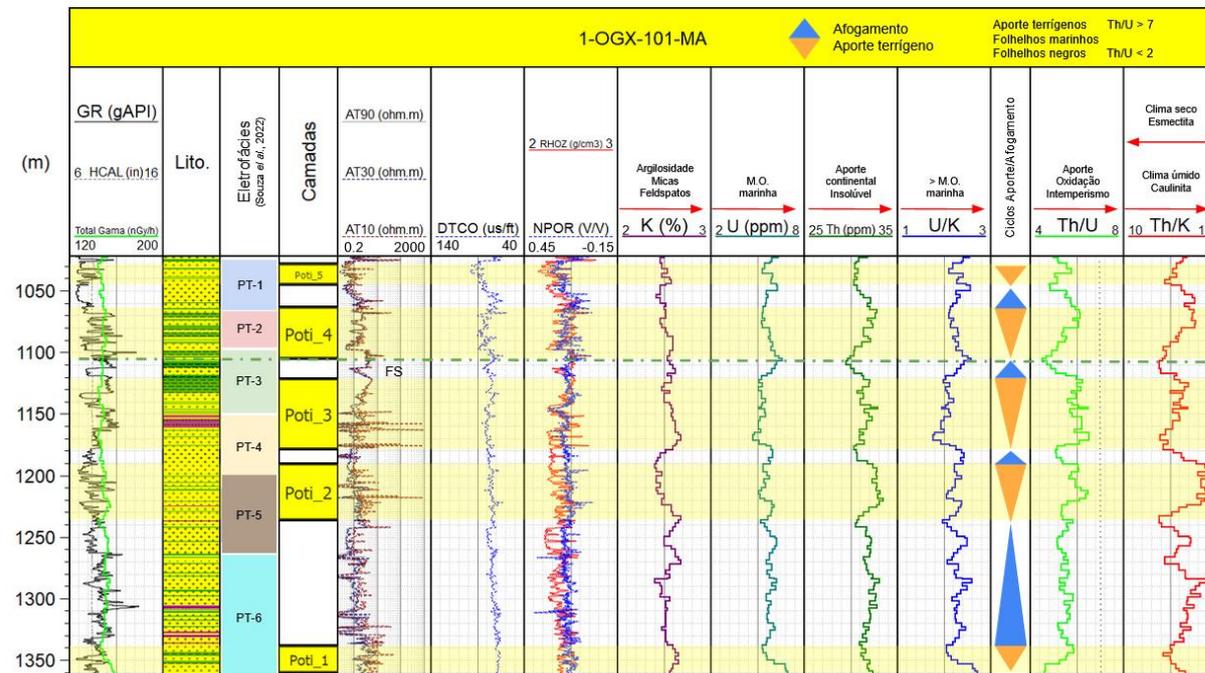


Figura 32: Interpretações paleoambientais do poço OGX-101 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.

De modo geral, vê-se curvas mais “nervosas” neste intervalo da formação Poti do poço OGX-101. Isso se dá talvez pelo fato de a litologia ser bem intercalada entre material fino e arenoso. Também é possível ver alguns intervalos onde há o *crossover* do densidade/neutrão, indicando possíveis reservatórios.

Este poço não apresenta intrusão magmática e as eletrofacies indicadas nele são as que geralmente ocorrem no intervalo superior da Formação Poti.

O intervalo **Poti_1** mostra GR diminuindo da base para o topo, AT com valores intermediários na segunda década, DTCO alto e um *crossover* no RHOZ/ NPOR. O K tem forte tendência de aumento para o topo enquanto que o U e O Th mostram o contrário. As razões de U/K e Th/U marcam bem um intervalo de aporte terrígeno e o Th/K marca um aumento da tendência do clima mais seco para o topo.

Antes do **Poti_2** temos um decréscimo acentuado na curva de K e as curvas de U/K e Th/U muito bem comportadas e mais próximas, marcado assim um grande intervalo de afogamento. Já no intervalo marcado, pode-se observar um GR e AT mais elevados, DTCO e RHOZ/ NPOR com padrões muito similares ao intervalo anterior. O K mostra uma queda expressiva para o topo e o contrário ocorre com o Th. O U não apresenta tendencia clara. A razão de U/K não mostra tendencia clara

igualmente, mais as razões de Th/U e Th/K tem crescimento ascendente marcado um intervalo de possível clima cada vez mais úmido e com aportes terrígenos.

O intervalo do **Poti_3** neste poço poderia ainda ser dividido em duas partes, o que acontece na discriminação das eletrofacies, mas mantendo as demarcações com base nos dados espectrais optou-se por apenas um intervalo de aporte terrígeno. A parte inferior apresenta GR crescente ascendente e resistividade alta. Os padrões das demais curvas geofísicas está similar ao intervalo anterior. Já na parte superior, O GR é decrescente para topo, resistividade baixa, DTCO regular e RHOZ/ NPOR sem apresentar intervalo de reservatório. De modo geral para o Poti_3 o K tem uma queda visível e o U e Th uma crescente mais discreta. Embora as razões U/K e Th/U estejam afastadas esse afastamento é mais expressivo na base do intervalo do que no topo. Todavia, foi marcado um intervalo de aporte terrígeno tendo em vista o aumento de K e Th e de Th/K, indicando um clima mais úmido e suscetível a maiores taxas de intemperismo.

No intervalo **Poti_4** o GR é em média com valores altos e decrescentes ascendentes, justificados com uma maior laminação de folhelhos. AT, DTCO e RHOZ/ NPOR mostram tendências de crescimento para o topo e ainda assim mantendo valores baixos a médios. O K e o U mostram diminuição para o topo diferentemente do Th. As razões marcam bem um intervalo de aporte terrígeno com o afastamento aumentando para o topo das razões de U/K e Th/U. A curva de Th/K ainda mostra a evolução de um ambiente cada vez mais úmido para o topo.

O intervalo **Poti_5**, bem delgado, tem GR com valores medianos e aumentando para o topo. As curvas de resistividade, sônico e densidade/neutrão tem diminuição para o topo. O K e o U apresentam queda para o topo e as razões marcam bem um intervalo de aporte terrígeno.

Neste poço é possível observar bem a evolução e mudanças de ambiente. Os intervalos Poti_1 e Poti_2 apresentam GR médio mais baixo e arenitos mais limpos. Já a partir do Poti_3 vê-se o um GR mais elevado e a presença de mais laminações de folhelhos. Esses pontos podem evidenciar a evolução de um ambiente mais proximal, de maior energia, como um delta para um ambiente mais distal, de menos energia e até mesmo restrito, como um estuário ou lagunar aberto.

Na próxima figura, 33, é mostrado e discutido os resultados para o poço OGX-110.

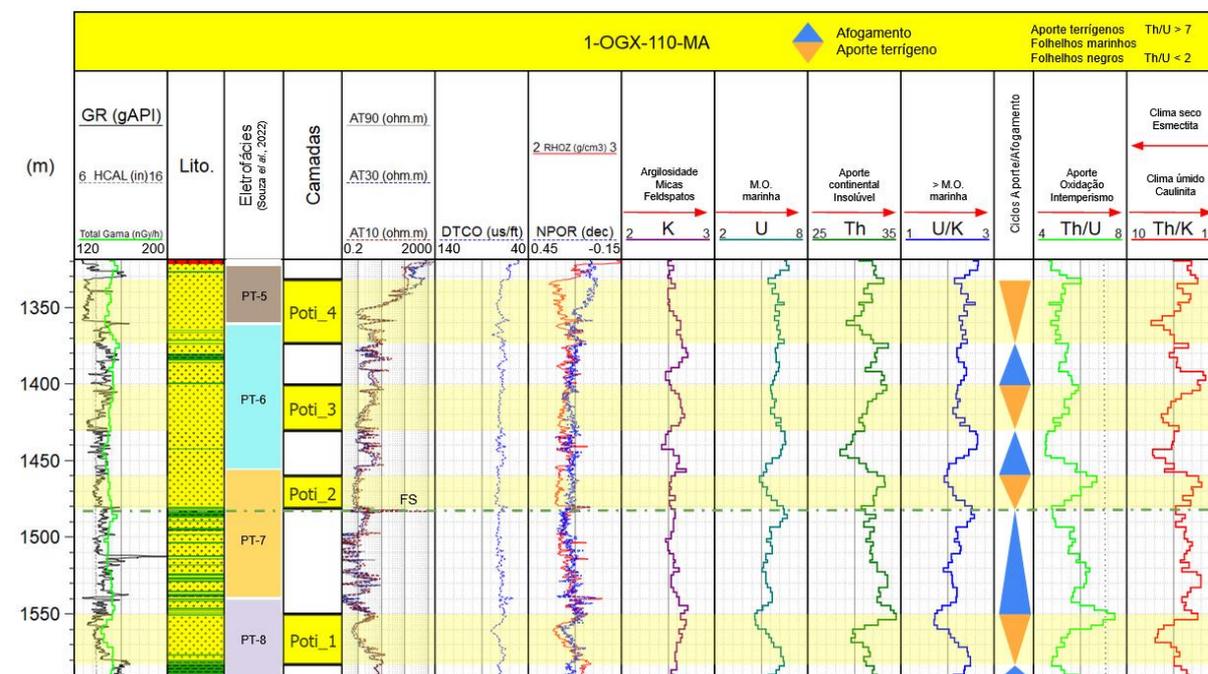


Figura 33: Interpretações paleoambientais do poço OGX-110 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.

O poço OGX-110 é o que melhor correlaciona os intervalos de aporte terrígeno com os intervalos destacados como reservatório pelo *crossover* do densidade/neutrão. No Poti_4 isso fica ainda mais claro tendo o *crossover* em formato triangular com o topo mais largo coincidindo com o topo do intervalo de aporte. Neste poço as eletrofácies destacadas são as que estão abaixo da soleira, PT-8 a PT-5.

O intervalo **Poti_1** tem GR com tendência de queda para o topo assim com os outros perfis. O K e o Th apresentam crescimento para o topo enquanto que o U diminui. As razões mostram muito bem um intervalo de aporte.

O intervalo **Poti_2** apresenta característica muito parecidas com o intervalo anterior. Apesar disso, a resistividade é bem baixa em todo intervalo e o reservatório parece melhor comportado tendo como base as curvas de densidade e neutrão. As curvas elementares e suas razões também apontam comportamento bem similar ao intervalo anterior. A superfície de inundação (FS) foi marcada no final do ciclo de

afofamento anterior concomitante com expressa mudança de comportamento de todos os perfis geofísicos além de ser máximo local de U/K e mínimo local de Th/U.

O intervalo **Poti_3** mostra aumento ascendente nas curvas de GR, AT e RHOZ. Diminuição do neutrão e invariância para o DTCO. O GR e o RHOZ/ NPOR mostram pior das características de reservatório no topo deste intervalo. O K e o U têm queda ascendente e o Th aumento. Um ciclo de aporte é bem marcado pelas razões gamaespectrais.

O intervalo **Poti_4**, como dito anteriormente, parece ser o melhor intervalo indicado para reservatório de hidrocarboneto. A curva de GR confere o intervalo de arenito limpo mostrado na litologia. Os valores de resistividade estão altos, batendo a quarta década no topo. Além disso, existe o grande distanciamento no *crossover* das curvas de densidade e neutrão. As curvas elementares e suas razões confirmam um ciclo de aporte no intervalo. Interessante perceber neste poço que as laminações de folhelho estão praticamente todas representadas nos intervalos de afofamento. Nestes mesmos intervalos o GR também tende a ser mais elevado em relação às profundidades de aporte.

Na próxima imagem, figura 34, será visto as interpretações do último poço estudado no presente trabalho. Pode-se perceber que o poço OGX-93 apresenta todas as eletrofácies caracterizadas, em outros poços, por Souza *et. al.*, 2022 e que ele tem intervalos onde a curva de *caliper* mostra grandes variações. Isso ocorre, pois, este poço apresenta grandes variação em seu diâmetro provavelmente por conta de espiralação da broca durante a perfuração. Essas espiralações podem trazer danos aos dados de poço cujas ferramentas precisam de contado com a formação para geração de dados confiáveis, como por exemplo as curvas de densidade e neutrão.

Podemos observar que mais uma vez a superfície de inundação é marcada entre as eletrofácies PT-3 e PT-2. Excluindo os poços OGX-110 e PGN-5 que as FS marcadas entre as eletrofácies PT-7 e PT-6, os outros 3 poços tem essa superfície marcada na transição PT-3 e PT-2.

No intervalo da Formação Poti neste poço não é possível identificar nenhum ponto que haja o *crossover* de densidade/neutrão, ou seja, possivelmente não apresenta intervalo de reservatório.

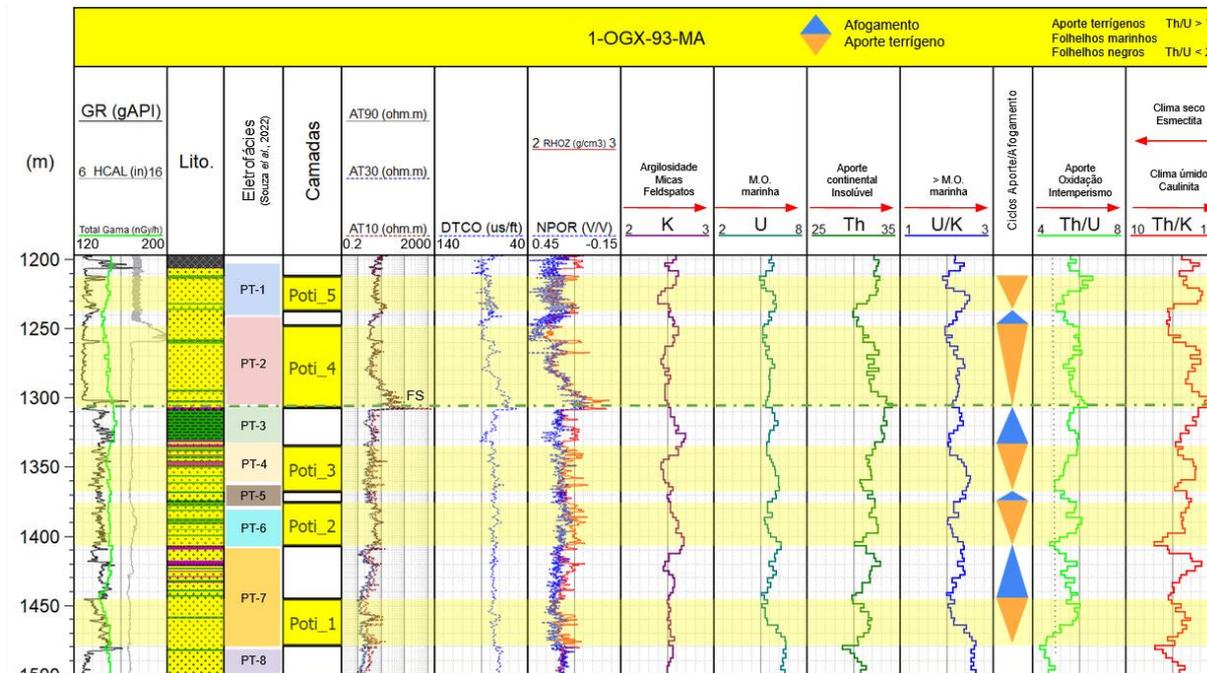


Figura 34: Interpretações paleoambientais do poço OGX-93 feitas a partir de dados gamaespectrais de laboratório adquiridos a partir de amostras de calha, redescrição da litologia utilizando amostras de calha e perfis geofísicos de poços.

Em geral, a Formação Poti deste poço pode ser subdividida em duas partes, superior e inferior. Na parte inferior, é observado valores de GR e AT mais baixos, sônico e densidade/neutrão têm comportamento sem muita variação. Esse intervalo abrange os ciclos Poti_1 a Poti_3 incluindo o intervalo de folhelho. Já a parte superior tem GR muito baixo, perto de 30 API. Resistividade, sônico e densidade/neutrão apresentam valores decrescentes para o topo com um pico positivo expressivo na base. Isso pode representar uma discordância erosiva causada possivelmente pela mudança de ambiente de menos energia para um de mais energia, como por exemplo o avanço de um delta. Interessante observar os comportamentos das curvas de Th e Th/K. Ambas mostram um aumento ascendente até a FS marcada e após isso uma tendência de estabilidade, indicando maior aporte em um provável clima mais úmido.

O intervalo **Poti_1** apresenta GR diminuindo para o topo assim como a tendência geral dos demais perfis. As curvas U/K e Th/U marcam bem um ciclo de aporte além de razão Th/K corroborar com uma tendência de aumento para o topo, mostrando a evolução para um clima mais úmido.

O **Poti_2** tem características muito similares ao intervalo anterior. O *track* de litologia mostra um intervalo com mais intercalações de finos. Destaque para o aumento na curva de densidade. O *caliper* mostra ligeiro arrombamento no intervalo.

O intervalo **Poti_3** também tem características muito similares aos intervalos anteriores, dando destaque para a litologia com mais intercalações de finos entre folhelhos e siltitos.

O intervalo **Poti_4** é um intervalo de quebra de tendências em todas as curvas geofísicas e geoquímicas. O GR é bem baixo e sem variação, como relatado no início da descrição deste poço. Os outros perfis geofísicos mostram tendências de queda ascendente e a parte superior deste intervalo indica grave arrombamento da formação evidenciado pelas curvas de HCAL e RHOZ e NPOR. As razões U/K e Th/U marcam um ciclo de aporte.

No intervalo **Poti_5** os destaques vão para um GR mais nervoso ainda que baixo. Curvas de DTCO, RHOZ e NPOR parecem ser afetadas pelo HCAL espiralado. As razões U/K e Th/U marcam um ciclo de aporte. Importante enfatizar neste poço que o intervalo Poti_2 é bem correlacionado com a eletrofacies PT-6; Poti_3 com PT-4; Poti_4 com PT-2 e Poti_5 com PT-1. A correlação dos poços quanto as eletrofacies auxiliou no melhor entendimento das zonas dentro da Formação Poti e ajudou na identificação dos ciclos de aporte/afogamento. Agora, a proposta apresentada é uma correlação dos poços a partir dos dados gamaespectrais adquiridos das amostras de calha. Na figura 35 podemos ver os poços em cota, mesma escala e com foco nos dados gamaespectrais.

Todos os cinco poços estão alinhados na mesma cota de -1.300 metros. Verifica-se que os primeiros dois poços, PGN-5 e OGX-110, tem identificados apenas 4 ciclos de aporte, talvez devido às intrusões magmáticas na parte superior da Formação Poti. Já o poço OGX-49 tem a soleira intrudindo a porção inferior da formação estudada. Os demais poços não apresentam intrusões. Já nos demais três poços, as litologias de folhelhos e siltitos são identificadas na parte superior da Formação Poti. Na figura 36, Ribeiro *et al.* (2021) caracterizam as partes mais basais dos poços PGN-5 e OGX-110 como de clima mais seco e frio de acordo com a proxie Sr/Cu e se confirma com uma tendência geral de queda dos valores de Th/K para o topo, na figura 36.

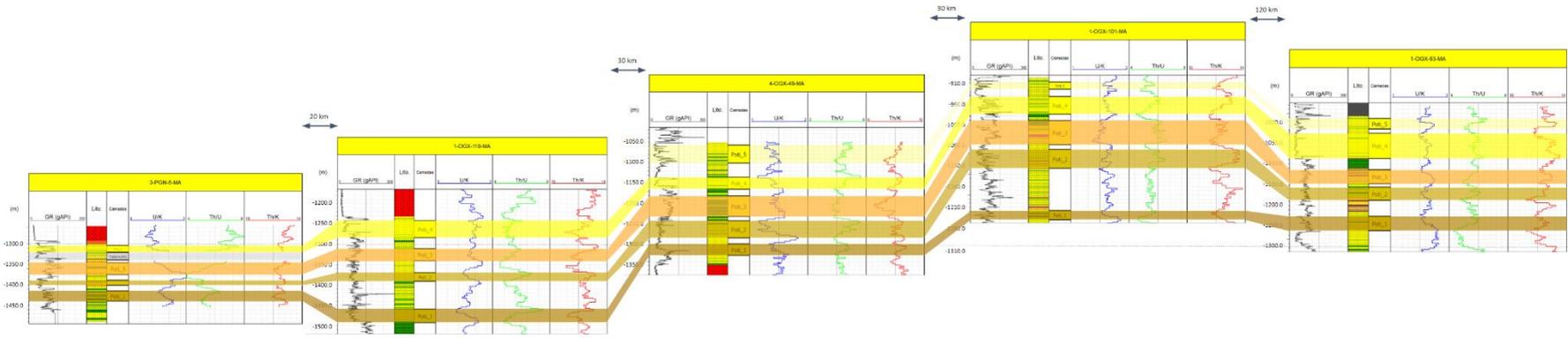


Figura 35: Correlação estratigráfica com base nos elementos radioativos de K, U e Th e suas razões.

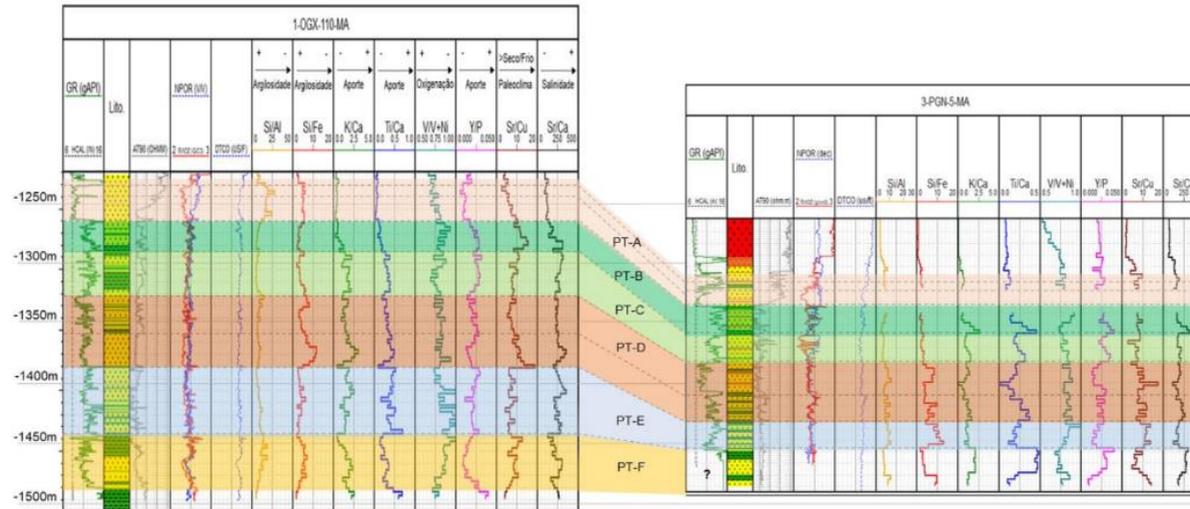


Figura 36: Correlação quimioestratigráfica da Formação Poti (Fonte: Ribeiro et al 2021).

A evolução do ambiente, de acordo com Ribeiro *et al.*, 2021 é para uma deposição mais agradacional a levemente progradacional (Ti/Ca, K/Ca e Y/P). O clima levemente mais úmido e quente (Sr/Cu). Essa evolução é representada no seu trabalho pela transição das zonas PT-F para PT-E, que no presente trabalho são relacionadas as partes basais da Formação Poti, ciclos Poti_1 e Poti_2.

No trabalho de Nobre *et al.* (2019) três poços são trabalhados, PGN-5, OGX-101 e OGX-110. Ela propõe a identificação de diversas parasequências na Formação Poti a partir dos dados gamaespectrais. No poço PGN-5 foram identificados por ela 12 parasequências. No OGX-101 foram 19 e no OGX-110, 21.

Essas parasequências foram essenciais para o zoneamento proposto neste presente trabalho. Os objetivos foram alcançados mais facilmente, tendo essa interpretação de maior detalhamento. No poço PGN-5, presente trabalho, foram identificados quatro ciclos de aporte sedimentar terrígeno nas profundidades medidas de 1345, 1385, 1430 e 1455 metros.

Já no poço OGX-110 os ciclos de aporte foram identificados nas profundidades de 1330, 1400, 1460 e 1550 metros.

Por último, no poço OGX-101 os ciclos de aporte foram identificados nas profundidades de 1030, 1070, 1120, 1190 e 1340 metros.

9 CONCLUSÕES

Foi possível inferir com este trabalho condições paleoambientais e paleodeposicionais para a Formação Poti, com dados gamaespectrais nos cinco poços utilizados.

A metodologia de tratamento de dados adquiridos de amostras de calha se mostrou eficiente em ambas as fases de ajuste de profundidade e filtragem dos dados. O ajuste trouxe maior confiabilidade a profundidade medida dos dados de amostra de calha devido aos problemas de tempo de retorno. Além disso, a filtragem de média móvel foi essencial para suavização dos dados, trazendo maior correlação entre o GR de poço e a curva Total Gama medida em laboratório. As tendências das curvas elementares e das razões espectrais ficaram muito mais claras, facilitando assim a interpretação.

A correlação dos dados de perfis geofísicos foi importante para balizar as interpretações preliminares com os dados gamaespectrais. A comparação e o uso de trabalhos anteriores de caracterização de eletrofacies e quimiofacies foi de grande valia para comprovação e amarração da interpretação dos dados, correlação de poços e estabelecimento dos ciclos de aporte sedimentar terrígeno e de afogamento.

Os ciclos de aporte e afogamento em conjunto com os perfis geofísicos, principalmente a curva de GR, corroboram a bibliografia levantada sobre a formação e sugerem a transição de um ambiente de maior energia, possivelmente deltaico, proximal, evoluindo para um ambiente mais restrito de menor energia, possivelmente lagunar aberto ou estuarino, mais distal.

Além disso, os ciclos de aporte marcados confirmam os intervalos de reservatórios indicados pelo *crossover* de densidade/neutrão. Assim, o emprego dos elementos radioativos e suas razões podem servir como uma avaliação preliminar para identificação de intervalos de reservatório e sua qualidade, principalmente se tratando das razões U/K e Th/U.

Por fim, as etapas de tratamento de dados e interpretações mostram que os dados gamaespectrais adquiridos em laboratório apresentam qualidade suficiente para inferir uma caracterização paleoambiental e o zoneamento da Formação Poti. Essa metodologia e fluxo de trabalho poderia ser incluída na rotina de sondas e

plataformas de perfuração, junto com as etapas de descrição de amostras de calha, análises geoquímicas (XRF e XRD) e da avaliação de perfis. As curvas gamaespectrais elementares de laboratório tem qualidade para auxiliar a interpretação, mesmo em poços onde as curvas espectrais não adquiridas em poço.

10 REFERÊNCIAS

- <via <http://dicionariodopetroleo.com.br/dictionary/amostra-de-calha/>>, Dicionário do Petróleo (Acesso em 2020);
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. **Inundações marinhas fanerozóicas no Brasil e recursos minerais associados**. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (Org.). Geologia do continente sulamericano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p.43-58;
- ARÊAS, Igor; Ferrari, André; Bezerra, José; Ferraz, André. (2013). **A influência Tectônica do Lineamento Transbrasiliano na Bacia do Parnaíba**.
- AYRES, A; Theilen, F (2001). **Natural gamma-ray activity compared to geotechnical and environmental characteristics of near surface marine sediments**. 48(1), 1–10. doi:10.1016/s0926-9851(01)00053-2;
- BARBOSA, Diego; BIJANI, Rodrigo; FREIRE, Fernando. (2021). **Modelagem E Inversão De Dados Potenciais Da Região Do Parque Dos Gaviões Na Bacia Do Parnaíba**. 10.224009/PPGDOT.2020.m.83796886272.
- CALONIO, L.W. **Influência de pirita e argilominerais nos cálculos de saturação da Fm. Poti, Bacia do Parnaíba: um estudo de caso no poço 3-PGN-5-MA**. Programa de PósGraduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra, Departamento de Geologia e Geofísica, Universidade Federal Fluminense. 2020;
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of Northern Basins of Brazil**. 1984. 586 p. Thesis (Doctorate) - University of Califórnia, Santa Bárbara, 1984;
- CORDANI, U. G. **The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic**. Revista Brasileira de Geociências.(12),78 – 88. 1982;
- CORDANI, Umberto G. e SATO, Kei. **Crustal evolution of the South American Platform, based on Nd isotopic systematics on granitoid rocks**. Episodes, v. 22, n. 3, p. 167-173, 1999;
- CRUZ, W.B.; ABOARRAGE, A.M.; SANTOS, M.E.C.M. - 1973 - **projeto Carvão da Bacia do Parnaíba -Relatório de progresso das etapas II e III**. Recife, DNPM-CPRM;

- CUMELLA, S. P.; SCHEEVEL, J. **Stratigraphic and rock mechanics influence on Mesaverde gas distribution, Piceance Basin, Colorado.** In: CUMELLA, S.P., SHANLEY, K.W., e CAMP, W.K. (eds.) *Understanding, exploring, and developing tight gas sands – 2005 Vail Hedberg Conference: AAPG Hedberg Series*, 2005, v.3, p. 105-136;
- CUNHA, F.M.B. **Evolução paleozóica da bacia do Parnaíba e seu arcabouço tectônico.** 1986. 107p. Dissertação (Mestrado em Geologia), IGEO-UFRJ, Rio de Janeiro;
- DAVIES, S.J.; ELLIOTT, T. **Spectral gamma ray characterization of high-resolution sequence stratigraphy: examples from Upper Carboniferous flúvio-deltaic systems, County Clare, Ireland.** In: Howell, J.A.; Aitken, J.F. (eds) *High resolution sequence stratigraphy: Innovations and applications. Geological Society of London, Special Publications*, v.104, p. 25-35, 1996.
- DELLA FAVERA, J.C. **Tempestitos da bacia do Parnaíba: um ensaio holístico.** 1990. 243p Tese (Doutorado em Geologia), IG-UFRGS, Porto Alegre;
- DRIA, D. E. 2007. **Mud Logging.** In *Petroleum Engineering Handbook: Volume V Reservoir Engineering and Petrophysics*, ed. L. W. Lake and E. D. Holstein, Chap. 3F, V-357/V-377. Richardson, Texas, USA: Society Of Petroleum Engineers;
- DUNN, C. 1993. **Wellsite Methods: Wellsite Math.** In *Development Geology Reference Manual*, ed. D. Morton-Thompson and A. M. Woods, Part 3. Tulsa, Oklahoma, USA: American Association of Petroleum Geologists;
- FAGUNDES, T. Dissertação de Mestrado. **Caracterização de cascalho de perfuração de poços por técnicas analíticas instrumentais.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo; Carina Ulsen, orientadora. 221 p São Paulo, 2018;
- FERTL, W. H., **Gamma Ray Spectral Data Assists In Complex Formation Evaluation**, *Trans., SPWLA Sixth European Formation Evaluation Symposium, London, March 1979; also Dresser Atlas publication No. 3335*, 61.
- FREIRE, Fernando; FERRARI, André; ALVES, Eliane; JUNIOR, Alberto; CARBONESI, Bruna; CARMO, Maíra; DIAS, Raquel; OLIVEIRA, Thais; SALES,

- Thais. (2019). **Correlação Lito-Cronoestratigráfica das Principais Bacias Sedimentares Brasileiras**. 10.13140/RG.2.2.23441.66406;
- GARCIA-HERNANDEZ, A., MISKA, S., YU, M., TAKACH, N., & ZETTNER, C. (2007). **Determination of Cuttings Lag in Horizontal and Deviated Wells**. *Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. doi:10.2523/109630-ms;
- GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. **Bacia do Parnaíba**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 57-68, jan./mar. 1994;
- GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F.; NOGUEIRA, A. C. R.; TOLEDO, P. M. 1990. **Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas**. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi, Sér. Ciênc. Terra.;
- GÓES, Ana Maria. **Formação Poti (Carbonífero inferior) da Bacia do Parnaíba**. 1995. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo;
- HASSAN, M. *et al.* **Fundamentals of the differential gamma ray log-interpretation technique**. In: *SPWLA 17th Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts*, 1976.
- KLAJA, J.; DUDEK, L. **Geological interpretation of spectral gamma ray (SGR) logging in selected boreholes**. *Nafta-Gaz*, v. 72, n. 1, p. 3-14, 2016;
- LIMA, E. A. M.; LEITE, J. F. **Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba: integração geológico-metalogenética: relatório final da etapa III**. Recife: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 1978. 212 p;
- LOPES, H. A. **Efeitos geoquímicos, mineralógicos e petrofísicos de soleiras máficas em rochas reservatório siliciclásticas da Bacia do Parnaíba: implicações para o sistema petrolífero**. 2019;
- MARSALA, A. F., KASPRZYKOWSKI, P., & KIMOUR, F. (2013). **Spectral Gamma Ray Complements Innovative Real Time Advanced Mud Logging Characterization While Drilling**. *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition*;
- MCCAY, A.T.; Harley, T.L.; Younger, P.L.; Sanderson, D.C.W.; Cresswell, A.J. **Gamma-ray Spectrometry in Geothermal Exploration: State of the Art Techniques**. *Energies* 2014, 7, 4757-4780. <https://doi.org/10.3390/en7084757>

- MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S.; STREEL, M. 1998. **Latest devonian to early late carboniferous biostratigraphy of Northern Brazil: an update**. *Bulletin du Centre de Recherches Elf Exploration Production, Pau*, v. 22, n. 1, p. 13-33, 1998;
- MIRANDA, F. S.; VETORAZZI, A.L.S.; CUNHA, P. R. C.; ARAGÃO, F. B.; MICHELON, D; CALDEIRA, J. L.; PORSCHE, E.; MARTINS, C.; RIBEIRO, R. B.; VILELA, A. F.; CORRÊA, J. R.; SILVEIRA, L. S.; ANDREOLA, K.; ENEVA S.A. Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2018, **Atypical igneous-sedimentary petroleum systems of the Parnaíba Basin, Brazil: seismic, well logs and cores**. <http://sp.lyellcollection.org/> by guest on September 4, 2018;
- MIRANDA, Frederico Silveira de. **Caracterização geológica da Formação Pimenteiras como potencial reservatório do tipo shale-gas, Devoniano da Bacia do Parnaíba**. Rio de Janeiro, 2014. xxi, 235p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014;
- MYERS, K. J.; BRISTOW, C. S. **Detailed sedimentology and gamma-ray log characteristics of a Namurian deltaic succession II: Gamma-ray logging**. *Geological Society, London, Special Publications*, v. 41, n. 1, p. 81-88, 1989.
- NAGANAWA, S., Suzuki, M., Ikeda, K., Inada, N., & Sato, R. (2020). **Modeling Cuttings Lag Distribution in Directional Drilling to Evaluate Depth Resolution of Mud Logging**. *SPE Drilling&Completion*. doi:10.2118/189615-pa;
- NERY, G. G., **Perfilagem em Poço Aberto, Apostila do Curso de Engenharia de Petróleo, PETROBRAS**, 1990;
- NERY, Geraldo Girão; **Perfilagem Geofísica de Poço Aberto – fundamentos básicos com ênfase em petróleo**. – Rio de Janeiro; SBGf, 2013; p. 25-42/63-75;
- NIELSEN, B. Leth *et al.* **Gamma-Ray Analysis for U, Th, and K on Bulk Cutting Samples from Deep Wells in the Danish Subbasin and the North German Basin**. 1987
- NOBRE, J. A. **Interpretação Paleodeposicional das Formações Poti e Cabeças com base em dados Gamaespectrais obtidos em amostras de Calha de Poços da área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba**. 2019. 71f.

- Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Fluminense – Instituto de Geociências, Niterói, 2019;
- NOBRE, J. A. ***Quaternary warming and cooling trends in the Bransfield Basin, Antarctic Peninsula, based on gamma-ray spectrometry.*** *Geo-Marine Letters*. P. 3-8, 2020;
- PEREIRA, R. M., NOBRE, J. A., SARAIVA, C. A. F., FRANCISCO DAVILA, R. S., FREIRE, F. M. (2021). ***Acquisition of spectral gamma-ray data from cuttings, with application in the paleoenvironmental interpretation of the Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Brazil.*** *Brazilian Journal of Geophysics*, 39(4), 585-595.
- PEREIRA, R. M. Dissertação de Mestrado. Interpretação **Paleodeposicional da Formação Cabeças a partir de Dados Gamaespectrais de Poços da Área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba.** Universidade Federal Fluminense. Niterói, p. 122. 2020;
- Petrobras. DEPEX. **Manual de Subsuperfície; Roteiro básico para acompanhamento geológico de poços.** 2 ed. Rio de Janeiro, IBP, 256 p., 1984;
- PLUMMER, F. B; PRINCE, L. I.; GOMES, F. A. **Estados do Maranhão e Piauí. In: Relatório do Conselho Nacional do Petróleo.** Rio de Janeiro: Conselho Nacional do Petróleo, 1946, p.87-134;
- Processamento e Interpretação de dados magnetométricos, gravimétricos e radiométricos. Apostila Teórica de Gamaespetrometria, 2013.
- Radiation Solutions Inc. **RS-125/230 User Manual, Revision 1.07** - December 2018, Firmware Version 5v95, Part Number D-1009;
- REZENDE, N. G. A. M. 2002. **A zona zeolítica da formação corda, Bacia do Parnaíba.** 2002. 142 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2002;
- RIBEIRO, L. F. **Interpretação Paleoambiental E Paleodeposicional Da Formação Poti Com Base Em Proxies Geoquímicas, Na Área Do Parque Dos Gaviões, Bacia Do Parnaíba.** 2021. 100f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Fluminense – Instituto de Geociências, Niterói; 10.13140/RG.2.2.16817.10084.

- RIDER, M. (2002). *The Geological Interpretation of Well Logs*. [S.l.]: Rider-French;
- ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; ARAI, M. **A passagem aptiano-albiano na Bacia do Grajaú, MA**. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p.101-117;
- ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS JUNIOR, A. E. **Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro**. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p. 67-76;
- SANTOS, G. O. R.; **Avaliação Do Potencial Da Formação Pimenteiras Parareservatórios Não Convencionais Do Tipo Shale-Gasno Poço 1-Ogx-101-Ma, Área Do Parque Dos Gaviões, Bacia Do Parnaíba**. 2022. 115f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Fluminense – Instituto de Geociências, Niterói. 10.13140/RG.2.2.23007.33440;
- SANTOS, M. E. C. M.; CARVALHO, M. S. S., **Paleontologia das bacias do Parnaíba, Grajaú e São Luís**. CPRM Serviço Geológico do Brasil – DGM/DIPALE - 2009. 215 p;
- SARAIVA, Carlos Augusto; Alves Nobre, Jeniffer; Santos, Rodrigo; Soares de Oliveira, Filipe; Pereira, Ricardo & Silva, Cleverson; Freire, Fernando. (2022). **Interpretação Paleoambiental e Paleodeposicional a partir da Correlação de Dados Rocha-Perfil na Área Do Parque Dos Gaviões, Bacia Do Parnaíba**. 10.13140/RG.2.2.15353.13924;
- SERRA, O. *Fundamentals of Well-log Interpretation V. 1-the Acquisition of Data. Developments in Petroleum Science A*, v. 15, 1984.
- SERRA, Oberto *et al. Theory, Interpretation, And Practical Applicatons Of Natural Gamma Ray Spectroscopy*. In: SPWLA 21st Annual Logging Symposium. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 1980.
- SOUZA, Luanne; CALONIO, Lidia; SILVA, Cleverson; FREIRE, Fernando. (2022). **Proposta de Correlação Estratigráfica e Zoneamento do Reservatório Poti, na Área do Parque dos Gaviões, Bacia do Parnaíba, através do Reconhecimento de Eletrofacies**. 10.13140/RG.2.2.17964.74882.

- SOWEK, Guilherme Arruda *et al.* **Assinatura gamaespectrométrica de depósitos fluviais: estudo de caso na Formação Rio do Rasto, Permiano Superior da Bacia do Paraná.** Geologia USP. Série Científica, v. 13, n. 3, p. 83-98, 2013.
- TEIXEIRA, L. F. L. Dissertação de Mestrado. **Determinação dos radionuclídeos naturais urânio e tório nos sedimentos superficiais de sistema cananéia-iguape.** Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, Universidade de São Paulo. Barbara Paci Mazzilli, orientadora. São Paulo, 2017;
- VAZ, P. T. *et al.* **Bacia do Parnaíba.** Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 15, n. 2, p. 253-263, 2007;
- VETORAZZI, A.L.S. 2012. **Caracterização Geológica dos Arenitos da Formação Cabeças (Devoniano) Na Borda Leste da Bacia do Parnaíba.** Dissertação de Mestrado UFRJ/Igeo;
- WHITTAKER, A. H. 1987. **MudLogging.** *In Petroleum Engineering Handbook*, ed. H. B. Bradley, Chap 52 of *Petroleum Engineer*,

11 ANEXOS

Anexo 1 – Compilagem estatística dos dados espectrais filtrados dos cinco poços trabalhados.

Estatística dos dados filtrados dos poços da Formação Poti

	1-OGX-93-MA				1-OGX-101-MA			
	Total Gama (nGy/h)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Total Gama (nGy/h)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Máximo	157.18	2.70	6.66	34.18	160.02	2.68	6.98	33.70
Mínimo	141.90	2.40	4.98	28.84	144.42	2.40	4.74	29.56
Média	150.14	2.54	5.79	31.74	149.86	2.54	5.72	31.74
Moda	148.22	2.52	6.34	31.62	147.18	2.52	5.86	31.44
Desv. Pad.	2.84	0.06	0.41	1.03	2.92	0.07	0.41	0.89

	1-OGX-110-MA				3-PGN-5-MA			
	Total Gama (nGy/h)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)	Total Gama (nGy/h)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Máximo	158.72	2.74	6.80	34.54	159.64	2.58	7.78	32.70
Mínimo	143.06	2.44	4.60	28.52	95.60	1.52	2.97	19.17
Média	150.40	2.58	5.77	31.66	146.09	2.46	5.65	30.72
Moda	153.30	2.64	5.74	31.32	-	2.52	5.38	31.12
Desv. Pad.	3.29	0.06	0.52	1.14	14.97	0.27	1.05	3.40

	4-OGX-49-MA			
	Total Gama (nGy/h)	K (%)	U (ppm)	Th (ppm)
Máximo	116.94	2.82	4.38	23.26
Mínimo	101.86	2.38	2.80	18.30
Média	108.65	2.56	3.70	20.45
Moda	109.98	2.54	3.62	20.84
Desv. Pad.	3.12	0.08	0.33	1.04